
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

**Přestavba elektromechanického servořízení na
systém Steer by Wire**

**Conversion of electromechanicals servo control
to the Steer by Wire system**

Diplomová práce

Autor:
Vedoucí práce:
Konzultant:

Bc. Ondřej Apoštol
Ing. Jan Koprnický, Ph.D.
Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

ORIGINALNI ZADANI

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Velké poděkování patří mému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Koprnickému, Ph.D. za cenné rady, čas věnovaný mé práci a konzultacím. Díky patří také Ústavu mechatroniky a technické informatiky za umožnění uskutečnění této práce.

Anotace

Diplomová práce se zabývá systémem steer-by-wire. Úvodem je problematika systému „by-wire“ z pohledu leteckého průmyslu. Další část pojednává o systémech „by-wire“ v automobilové technice, jejich rozdělení dle funkčnosti a konstrukce, pohled na bezpečnost a jsou zde vysvětleny výhody i nevýhody těchto systémů. V třetí části je rozebráno elektromechanické servořízení u automobilů Škoda a všechny součásti elektromechanického servořízení. Dále je zde rozebrán přechod na systém steer-by-wire u automobilu Škoda. Návrh zahrnuje nutné úpravy v současném mechanismu řízení z hlediska konstrukčního, snímání vstupních dat pro elektronickou řídicí jednotku, programy pro jednotlivé provozní situace a návrh akčního členu řízení. V závěru je návrh a simulace systému steer-by-wire v programu Matlab.

Klíčová slova

Automobilová technika, steer-by-wire, elektromechanické servořízení, elektromotor, řídicí jednotka

Anotation

This diploma thesis deals with a steer-by-wire system. The first part introduces the "by wire" system from the point of view of an aircraft industry. The next part treats the "by wire" in the automobile technology, their classification according to function and construction, the problem of security. Advantages and disadvantages of these systems are explained here. The third part analyses electromechanical servo controls of Skoda automobiles. The proposal includes necessary adjustments in the current steering mechanism in respect of a construction, scanning the input data for the electronic control unit, programs for the particular operational situations and a proposal of a steering actuator. At the end, there is a proposal and a simulation of this system in the Matlab programme.

Key worlds

Automobile technology, steer-by-wire, electromechanical servo controls, electric motor, electronic control unit

Obsah

Prohlášení.....	3
Anotace	5
Anotation	5
Obsah	6
Úvod	10
1. Základní rozdělení	11
2. Fly-by-wire	13
2.1 Současnost fly-by-wire	13
2.2 Bezpečnost fly-by-wire	13
2.3 Analogové řízení	14
2.4 Digitální řízení	14
2.5 Výhody a nevýhody fly-by-wire	15
3. Drive-by-wire	16
3.1 Současnost drive-by-wire.....	16
3.2 Bezpečnost drive-by-wire	16
3.3 Steer-by-wire.....	16
3.4 Výhody a nevýhody drive-by-wire	18
3.5 Budoucnost drive-by-wire.....	19
4. Elektromechanické servořízení u automobilu Škoda	22
4.1 Princip řízení	23
4.2 Elektronika servořízení	24
4.2.1 Snímač momentu otáčení volantem G269	24
4.2.2 Snímač úhlu natočení volantu G85	25
4.2.3 Motor elektromechanického servořízení V187	25
4.2.4 Snímač otáček rotoru pro motor V187.....	26
4.2.5 Rychlost vozidla	26
4.2.6 Snímač otáček motoru G28	26
4.2.7 Řídicí jednotka J500.....	26
5. Návrh systému steer-by-wire	27
5.1 Koncepce systému steer-by-wire pro automobil Škoda.....	28
5.2 Princip steer-by-wire	29
5.3 Funkce motoru zpětné vazby	29
5.4 Přejít na systém steer-by-wire u automobilu Škoda	30
5.4.1 Konstruktivní úpravy	30
5.4.2 Snímač úhlu natočení	31
5.4.3 Snímač momentu natočení	31
5.4.4 Snímač polohy hřebenu přední nápravy	31
5.4.4 Lineární snímač polohy Tempsonics EP	35
5.5 Akční člen-elektromotor pro natočení kol	36
5.5.1 Řídicí signály pro akční člen.....	36
5.5.2 Požadavky na elektromotor.....	37

5.5.3 Návrh parametrů elektromotoru pro natáčení kol	37
5.6 Elektromotor zpětné vazby	45
5.6.1 Řídicí signály pro elektromotor zpětné vazby	46
5.6.2 Požadavky na elektromotor	46
5.6.3 Elektromotor zpětné vazby	46
5.7 Řídicí jednotka	47
5.7.1 Funkce řídicí jednotky	48
5.7.2 Návrh řídicích charakteristik	48
5.7.3 Charakteristiky pro motor zpětné vazby	53
6. Kritické poruchy	56
6.1 Kritické poruchy senzorů	56
6.2 Kritické poruchy motorů	57
6.3 Kritická porucha zdroje napájení	58
6.4 Kritická porucha elektronické řídicí jednotky	59
7. Simulace v programu Matlab	60
Závěr	63
Literatura	64
8. Přílohy	67
Příloha č. 1 – Technické parametry snímače Temposonics EP	67
Příloha č. 2 – Technické parametry servomotoru SMGEV 04A	69
Příloha č. 3 – Parametry motoru TFD-40 050	74
Příloha č. 4 – Charakteristiky pro zatáčení vpravo	75
Příloha č. 5 – Charakteristiky pro zatáčení vlevo	76
Příloha č. 6 – Charakteristiky pro motor zpětné vazby a zatáčení vlevo	80
Příloha č. 7 – Obsah CD	82

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma steer-by-wire s převodkou řízení [5]	17
Obr. 2 Schéma steer-by-wire se servomotory umístěnými v kolech [12]	18
Obr. 3 Interiér vozu Hy-Wire [6]	20
Obr. 4 The Sequel [7]	21
Obr. 5 Mazda Ryuga [8]	21
Obr. 6 Systém řízení [9]	23
Obr. 7 Snímač momentu otáčení volantu G269 [9]	24
Obr. 8 Návrh systému steer-by-wire	28
Obr. 9 Schéma systému steer-by-wire pro automobil Škoda	30
Obr. 10 Snímač Tempsonics EP [17]	36
Obr. 11 Aktivní měřicí oblast snímače Tempsonics EP [17]	36
Obr. 12 Určení úhlu příklonu rejdové osy [16]	39
Obr. 13 Určení vratného momentu vlivem příklonu rejdové osy	39
Obr. 14 Určení vratného momentu vlivem příklonu rejdové osy	40
Obr. 15 Rozměry servomotoru Accurax G5 SGMEV-04A [13]	43
Obr. 16 Rozměry a parametry šnekové převodovky Varvel MRT40 [14]	44
Obr. 17 Rozměry motoru zpětné vazby TFD-40 050 [15]	47
Obr. 18 Zapojení dvou protiběžných motorů	57
Obr. 19 Zálohování motoru zpětné vazby	58
Obr. 20 Simulační schéma senzoru úhlu natočení	61
Obr. 21 Simulační schéma systému steer-by-wire	62

Seznam grafů

Graf 1 Závislost síly vyvolané elektromotorem zpětné vazby na úhlu natočení volantu pro zatáčení vpravo	53
Graf 2 Závislost natočení volantu na času při automatickém návratu zprava do nulové polohy	54
Graf 3 Závislost síly vyvolané elektromotorem zpětné vazby při návratu do nulové polohy při návratu zprava	55

Seznam tabulek

Tabulka 1 Jízdní charakteristika P0	48
Tabulka 2 Jízdní charakteristika P1	49
Tabulka 3 Jízdní charakteristika P2-1	49
Tabulka 4 Jízdní charakteristika P2-2	50
Tabulka 5 Jízdní charakteristika P3-1	50
Tabulka 6 Jízdní charakteristika P3-2	50
Tabulka 7 Jízdní charakteristika P4-1	51
Tabulka 8 Jízdní charakteristika P4-2	51
Tabulka 9 Jízdní charakteristika P5-1	52
Tabulka 10 Jízdní charakteristika P5-2	52

Seznam použitých zkratek

ABS	– Protiblokovací systém (<i>Anti-lock Brake System</i>)
ECU	– Elektronická řídicí jednotka (<i>Electronic Control Unit</i>)
ETC	– Elektronický řídicí systém škrticí klapky (<i>Electronic Throttle Control</i>)
LDWS	– Složitější forma automatického řízení (<i>Lightweight Drive System</i>)
CWS	– Jednodušší forma automatického řízení (<i>Control Wheel Steering</i>)
CAN	– Komunikační síť (<i>Controller Area Network</i>)
GM	– General Motors

Seznam použitých symbolů

α	úhel natočení předních kol
α_l	úhel natočení předních kol
β	úhel natočení volantu
σ	úhel příklonu rejdové osy
ω	úhlová rychlost
G	přenos
F_{za}	zatížení jednoho kola
I	proud
i	převodový poměr převodovky
K	zesílení
M	moment
R	odpor
R_z	zatěžovací odpor
r_d	dynamický poloměr rejdu
r_o	poloměr rejdu
s	laplaceův operátor
T	časová konstanta
t_m	čas potřebný k natočení kol
v	rychlost automobilu
v_v	rychlost otáčení volantem

Seznam příloh

- Příloha č. 1 – Technické parametry snímače Temposonics G
- Příloha č. 2 – Technické parametry servomotoru SMGEV 08A
- Příloha č. 3 – Parametry motoru TFD-40 050
- Příloha č. 4 – Charakteristiky pro zatáčení vpravo
- Příloha č. 5 – Charakteristiky pro zatáčení vlevo
- Příloha č. 6 – Charakteristiky pro motor zpětné vazby a zatáčení vlevo
- Příloha č. 7 – Obsah CD

Úvod

Jedním z hlavních požadavků na dnešní automobily je přesné a bezporuchové řízení. Správnému fungování systému řízení automobilu by měla být věnována náležitá pozornost.

Většina dnešních automobilů využívá klasickou koncepci známou již od počátku automobilového průmyslu vůbec. Volantem pomocí hřídele provedeme natočení kol. Kromě zavedení posilovače řízení v této koncepci k mnohým změnám nedošlo.

Díky zavádění nových technologií se stále častěji objevuje potřeba odebrat mechanickou vazbu mezi volantem a koly. Proto někteří výrobci začínají opouštět klasickou koncepci s mechanickým spojením, která je v mnoha ohledech dostačující a začínají přecházet k tzv. „by-wire“ technologii, tedy nahrazení mechanických vazeb vodiči. Jednou z těchto technologií je steer-by-wire. Jedná se o nahrazení mechanické vazby mezi volantem a koly, která umožňuje mnohem větší variabilitu při ovládání vozidla.

Úvodem práce je rozebrána problematika „by-wire“ systémů. Dále je prostudováno elektromechanické servořízení automobilu Škoda. Na základě těchto poznatků je navržena přestavba současného elektromechanického servořízení na systém steer-by-wire a jeho simulace.

1. Základní rozdělení

Technologie „by-wire“ zasahuje do několika oblastí v řízení dopravních prostředků.

- **Fly-by-Wire**

Historicky první technologie „by-wire“. Nahrazení mechanických vazeb elektronickým přenášením informace proběhlo téměř u všech součástí týkajících se primárních i sekundárních řídicích systémů. Mezi primární patří všechny systémy, které slouží k ovládání letadla tzn. změna otáček či tahu motoru, náklon výškových klapek, natočení směrového kormidla, ale i ovládání podvozku. Sekundární systémy jsou spíše podpůrné, sloužící pro ulehčení práce pilota, nebo zvýšení komfortnosti letu. Ovládání vztlakových klapek, stabilizátor nebo aktivní i pasivní autopilot se řadí mezi sekundární systémy.

Z důvodu bezpečnosti jsou všechny tyto systémy dvakrát až čtyřikrát jištěny. Zpracovávání signálů může být prováděno buď analogově, nebo digitálně (*viz kapitola 2 Fly-by-Wire*).

- **Drive-by-wire**

Technologie drive-by-wire se skládá z několika částí. Každá z těchto částí je samostatná technologie, která nahrazuje určitou mechanickou vazbu v automobilu vazbou elektronickou (*viz kapitola 3 Drive-by-Wire*).

- **Break-by-Wire**

Představuje nahrazení tradiční hydromechanické brzdy a součástí, jako jsou čerpadla, kapalina, hadičky atd., elektronickými senzory a aktuátory. Technologie brake-by-wire je neustále ve vývoji a zavedena je u sériově vyráběných vozů pouze jako ruční brzda. Z důvodu bezpečnosti jsou všechny prvky (senzory, přenosové sběrnice, ECU (elektronická řídicí jednotka)) tohoto systému minimálně dvakrát jištěny. Při sešlápnutí brzdového pedálu, jsou pomocí ECU přečtena data ze všech důležitých senzorů (rychlosti, polohy brzdového pedálu), zpracována a ECU vygeneruje 4 nezávislé příkazy, které zašle do příslušných brzd. Tyto signály také obsahují informace pro ovládání ABS systému a systému kontroly stability. Vše se provádí až tisíckrát za vteřinu.

Pokud dojde k výpadku sběrnice mezi ECU a brzdami, je tato sběrnice nahrazena záložní, která vede přímo od senzorů k brzdám a ECU jednotka není využívána. Díky elektronickému zpracování signálů je velmi snadná aplikace některých bezpečnostních prvků, jako jsou samočinné zastavení vozidla či kontrola stability (optimálněji rozložená brzdná síla na kola ku aktuálním jízdním podmínkám).

- **Steer-by-wire**

Technologie, která se v dnešní době používá hlavně u vysokozdvizných vozíků, nahrazuje volantovou tyč pomocí senzorů a elektronických vazeb (viz kapitola 3.3 *Steer-by-wire*).

- **Throttle-by-Wire**

Neboli Electronic throttle control (ETC). Jedná se o nahrazení mechanické vazby mezi plynovým pedálem a škrticí klapkou. Většina automobilů v dnešní době používá snímač polohy klapky (throttle position sensor), který poskytuje vstupní informace pro protiblokovací systém, vstřikování paliva a ostatní systémy. ETC však používá vstupní data z několika senzorů (čidlo polohy plynového pedálu, čidlo otáček motoru, snímač rychlosti vozidla, teplota motoru), které elektronická řídicí jednotka zpracuje, vyhodnotí a optimálně otevře škrticí klapku. Přínosy ETC jsou pro většinu řidičů do jisté míry bez povšimnutí.

Celkový koncept je navržen pro plynulou a konzistentní jízdu za jakýchkoli podmínek (studený motor, rozjezd do kopce, míra zatížení atd.) a v neposlední řadě zlepšení pro velmi rychlé změny jízdních podmínek, jako je náhlá akcelerace či decelerace. Narozdíl od všeobecného mínění má ETC velmi omezený přínos v emisích a spotřebě paliva. Na druhou stranu, integrace prvků, jako je tempomat či kontrola stability, je pro tento systém velmi snadná.

2. Fly-by-wire

Ve čtyřicátých letech minulého století začala být neúnosná situace ohledně řízení letadla pomocí mechanických a hydromechanických systémů. Důvodem toho byla poměrně velká hmotnost těchto systémů a samotná konstrukční náročnost při řízení letadla pomocí kladek, klik, lanek a různých podpůrných hydraulických obvodů. Oba tyto systémy často vyžadují zálohování, čímž se opět zvyšuje hmotnost i náročnost konstrukce. Zároveň tyto systémy nejsou schopny jakkoli reagovat na měnící se aerodynamické podmínky během letu. Proto během 2. světové války začali letečtí konstruktéři pracovat na nahrazení mechanických vazeb mezi řídicím členem (výškové a směrové kormidlo letadla, plynové pedály) a řízeným členem (výškové a směrové klapky, motor) pomocí signálu přenášovaných „po drátech“ čistě elektronicky. Tato technologie se začala nazývat fly-by-wire.

2.1 Současnost fly-by-wire

Dva největší letečtí výrobci současnosti šli dvěma rozdílnými cestami. U Airbusu je řídicí počítač nadřazen pilotovi, ale u Boingu je pilot nadřazen řídicímu počítači. Tzn. u Boingu se řízení jeví spíše jako řízení přímé (mechanické), samozřejmě s určitými vylepšeními (úměrné přitažení výškovky při malých náklonech, kompenzace klopivého momentu při změně tahu). Chce-li pilot překročit např. náklon, systém mu to umožní, ale po překročení určité hodnoty vzroste síla na řízení tak, aby pilot věděl, že není vše v pořádku. Kdežto u Airbusu pilot dává povely řídicímu počítači, který se na základě svého programu rozhodne, zda je provede a v jakém rozsahu. Oba tyto systémy mají své výhody i nevýhody. Pilot může udělat chybu, kterou u Airbusu potlačí řídicí počítač, avšak může dojít k chybnému vyhodnocení [1].

2.2 Bezpečnost fly-by-wire

U moderních letadel se používají čtyřnásobně jištěné fly-by-wire systémy, aby se zabránilo ztrátě signálu v případě výpadku jedno či dokonce dvou kanálů.

2.3 Analogové řízení

V roce 1950 poprvé vzlétá letadlo Avro Vulcan s analogovým řízením typu fly-by-wire. Ovládací prvky letadla jsou vybaveny snímači, které zasílají elektronické signály dále do řídicí jednotky. Hydraulické obvody jsou velmi podobné, jako u mechanického řízení.

Změnou je nahrazení mechanických servoventilů elektronicky ovládanými servoventily, které jsou řízeny pomocí řídicí jednotky. V této konfiguraci je nutné simulovat zpětnou odezvu systému, tzn. aby pilot „cítil“ odezvu systému např. ve směrovém kormidlu, které mu bude klást určitý odpor. V sofistikovanějších verzích byla elektronická řídicí jednotka nahrazena analogovým počítačem, který již umožňoval některé úpravy řízení letu, např. uvolnění stability použitím v prvních verzích letadla F-16, díky němuž byla dosažena výborná manévrovatelnost tohoto letounu [1].

2.4 Digitální řízení

Digitální řízení letounu pomocí fly-by-wire je velmi podobné svému analogovému předchůdci. Nicméně zpracovávání signálu již probíhá pomocí digitálních počítačů a pilot tak řídí letadlo za pomoci digitálního počítače. Řídicí počítač čte všechny vstupy z pilotních ovládacích senzorů, pomocí diferenciálních rovnic tyto signály zpracovává a posílá do příslušných řízených členů. Samotné naprogramování digitálního počítače je již prováděno „na míru“, ke konkrétnímu typu letadla s ohledem na jeho účel, aerodynamické vlastnosti a celkovou konstrukci letadla (v počítači je vytvořen model letadla, který simuluje dynamiku letounu). Tím je zajištěna jistá bezpečnost, protože pilot nemůže překročit určité přednastavené limity např. stoupání, klesání, omezení náklonů nebo překročení určité hranice přetížení. První digitální řízení fly-by-wire bylo použito v roce 1972 u letounu F-8 Crusader [2].

2.5 Výhody a nevýhody fly-by-wire

Výhody

Díky používání systému fly-by-wire došlo k výraznému snížení hmotnosti letadel, menší náročnosti údržby oproti mechanickému řízení, zvýšení komfortnosti při letu u dopravních letadel, zvýšení potenciálu a manévrovatelnosti u bojových letadel.

Nevýhody

Řízení je prováděno čistě elektronicky pokud tedy dojde k výpadku elektriny, hlavního či záložních počítačů, je letadlo zcela neovladatelné. Řídicí počítač může špatně vyhodnotit situaci a to může vést k fatálním následkům.

3. Drive-by-wire

3.1 Současnost drive-by-wire

V automobilové technice byl systém drive-by-wire zaveden kvůli ušetření místa a materiálu, snížení hluku, nahrazení mechanických vazeb a v neposlední řadě zavedení technologie označované jako platform nebo skateboard.

V podstatě se jedná o návrat ke klasické koncepci odděleného podvozku a karoserie používané v první polovině minulého století. Hlavní rozdíl je v tom, že v „podvozku“ je uloženo téměř vše, co potřebuje automobil k jízdě: motorová skupina (motor, převodovka, rozvodovka), kola s řízením, brzdami, nádrže na palivo, baterie atd., naopak karoserii lze namontovat několika šrouby a připojit pomocí konektorů. Díky tomu je možné při opravě zapůjčit jinou karoserii nebo mít pro jedno auto několik karoserií pro různé účely atd. Není však možné přímo mechanicky spojit ovládací prvky automobilu (volant, brzdy, plyn) s podvozkem a motorem či koly. Proto přenos informace mezi ovládacími prvky a akčními členy probíhá čistě elektricky (pomocí vodiče) tedy způsobem drive-by-wire. Takto se přenášejí informace nejen pro řízení, ale i pro převodovku, spojku a brzdy (používá alternativní označení x-by-wire).

3.2 Bezpečnost drive-by-wire

Poloha všech ovládacích prvků se přenáší pomocí servomechanismů, jejichž spolehlivost musí být srovnatelná se zařízeními v letecké či kosmické technice (tedy na velmi vysoké úrovni). Např. servomechanismus pro přenášení polohy volantu a pro elektrohydraulické brzdy je nutné napájet ze dvou zcela nezávislých zdrojů. To zvyšuje náklady, ale na druhé straně usnadňuje mnohá řešení, která by v klasické koncepci byla velmi obtížná. Adaptivní tempomat nemůže fungovat bez elektrohydraulických brzd. Servomechanické řízení může snadno přijímat korekce od systémů LDWS, příp. CWS atd. [3].

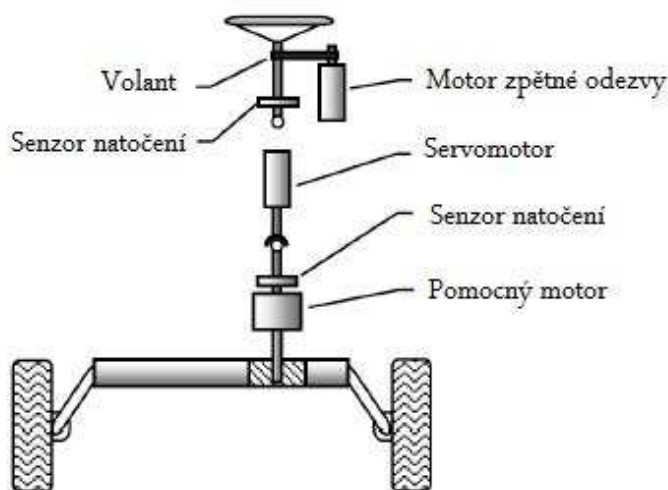
3.3 Steer-by-wire

Zatímco u některých částí systému x-by-wire není absence mechanického spojení rozpoznatelná, výrazné změny přináší metoda steer-by-wire, která přerušuje i mechanické spojení volantu (Obr. 1). Jde vlastně pouze o důsledné pokračování

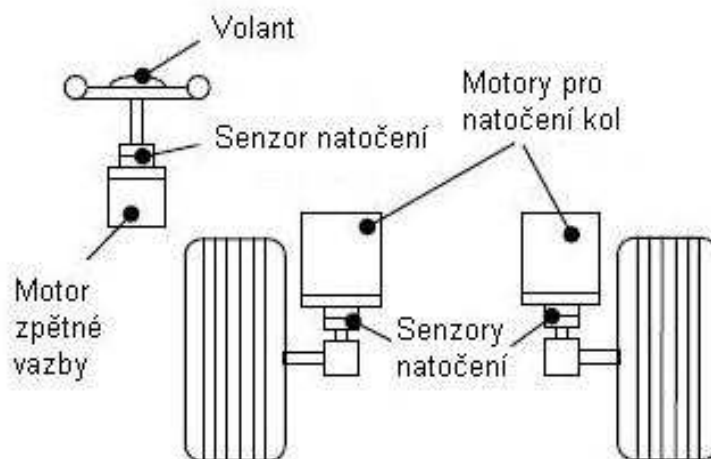
aplikace posilovače řízení. Mnohem větší pružnost řízení, ale poskytuje elektrický servomechanismus. Na volantu je pouze snímač polohy a elektrický servomotor natáčí kola do žádané polohy. Další motor poskytuje řidiči zpětnou vazbu o jeho zásahu, aby řidič pocítil síly působící na volant. Tuto technologii v současné době používají některé elektrické vysokozdvizné vozíky a traktory. Její realizace u silničních vozidel je omezena z obav o spolehlivost, i když u několika konceptů jako ThyssenKrupp nebo PRESTA bylo dokázáno, že zcela zbytečně [4].

V tomto případě ale není nutné, aby pro nastavování žádané hodnoty polohy kol sloužil klasický volant. Jedna z možností je použít joystick, který zcela mění koncepci řízení automobilu.

Další z možností této technologie je předávání informací ohledně stavu vozovky, aktuálních jízdních podmínkách a stavu vozidla pomocí hmatové technologie (Haptic Commander). Např. zpětná vazba reagující na nerovnosti vozovky je přenášena pomocí volantu, zatímco informace o stoupání nebo klesání svahu prostřednictvím zvyšujícího nebo snižujícího se odporu pedálu, informace o nebezpečném přiblížení vozidla nebo odklonu z bezpečné trasy mohou být sdělovány pomocí vibrací nebo v kritickém případě dokonce zastavením vozu.



Obr. 1 Schéma steer-by-wire s převodkou řízení [5]



Obr. 2 Schéma steer-by-wire se servomotory umístěnými v kolech [12]

3.4 Výhody a nevýhody drive-by-wire

Výhody

Automobil postavený na principu drive-by-wire má přinést mnoho výhod. Od optimálně rozložené hmotnosti, přes více místa v interiéru, vyšší úroveň stability i manévrovatelnosti. Jedním ze zlepšení by také měla být vyšší energetická účinnost automobilu. Nahrazením mechanické funkce volantu a pedálů elektronikou, zvýší se i pasivní bezpečnost automobilu a sníží se i hluk přenášený do kabiny. Kombinací funkce elektronického brzdění, pohonu a řízení kol se automobil dokáže v kritické situaci rychleji stabilizovat než doposud. Využívání nových funkcí (jako je joystick místo volantu) dává doposud nepoznanou svobodu designérům, kteří např. mohou všechny důležité ovládací prvky umístit na joystick (plyn, brzdu atd.).

Nevýhody

Náklady na výrobu těchto systémů jsou často vyšší než konvenční systémy. Mimořádné náklady vycházejí z větší složitosti, nákladů na vývoj a redundantních prvků potřebných k jistění systému. Selhání kontrolních systémů může vyústit v neovladatelný vůz.

3.5 Budoucnost drive-by-wire

Jako největší překážkou do postupného zavedení těchto systémů do sériové výroby, vidí automobiloví výrobci v bezpečnosti. „*Hlavním problémem výrobců, kteří aktivně zkoumají tyto systémy, bude přesvědčit samotné řidiče, že jejich automobil nebude dělat to samé, jako jejich neustále padající počítač v domácnosti*“¹.

Přesvědčit laickou veřejnost o funkčnosti a bezpečnosti systému drive-by-wire bude velmi složité. Avšak systém fly-by-wire, který funguje od 60. let minulého století bez větších problémů dokazuje, že bezpečnost zajistit lze. Dvakrát až čtyřikrát jištěný systém napájený ze dvou nezávislých zdrojů, prakticky vylučuje možnost selhání.

Jak by tedy mohl vypadat automobil budoucnosti? Jedním z adeptů na tento automobil byl představen na automobilovém veletrhu v Paříži v roce 2002. Automobil s názvem Hy-wire na Obr. 3, jako první na světě kombinuje pohon na vodíkové palivové články a technologii by-wire. Koncept pochází od firmy General Motors a je výsledkem mezinárodní spolupráce USA (konstrukce vozidla, elektrické rozvody), Německa (pohonný systém), Itálie (design) a Švédska (by-wire technologie). Jedná se o čtyřdveřové pětimístné vozidlo, které neobsahuje žádné pedály ani řadicí páku. Vše je integrováno v řídicím členu nazvaném X-drive. Tento člen je vzhledem velice vzdálený volantů a lze ho umístit na libovolnou stranu automobilu (pravé i levé přední sedadlo). Obsahuje dva úchyty tzv. handgrips a na středu je namísto airbagu umístěn malý LCD display. Pro akceleraci automobilu musí řidič otočit handgrips směrem od sebe, při brzdění naopak otočit k sobě, pro zatáčení vozidla vpravo či vlevo slouží pohyb směrem nahoru a dolů. Veškerá zpětná zrcátka jsou nahrazena kamerami, které přenášejí snímání obraz na LCD display. Zde jsou také zobrazována veškerá data ohledně samotné jízdy, jako je rychlost, ujeté kilometry, ale také úroveň palivových článků a dojezd. Vzhledem k tomu, že automobil je plně programovatelný lze nastavit výkon i jízdní vlastnosti. Můžeme libovolně nastavovat tvrdost brzd, sportovní či úspornou jízdu (výkon motoru), tvrdost podvozku a mnoho dalších parametrů týkající se jízdy. Díky odstranění všech mechanických vazeb došlo k velkému uvolnění prostoru. Motor je umístěn v podvozku automobilu, díky čemuž je celá přední část vozu prosklená.

¹ Citace z proslovu [10]

V podvozku jsou také umístěny palivové články a veškerá elektronika (technologie se nazývá „skateboard“). Díky této technologii je možné karoserii automobilu odebrat a nahradit jinou. „*Je to asi tak složité, jako vyměnit kryt u mobilního telefonu*“².

Tím můžeme nejenom změnit barvu karoserie nebo čalounění, ale i celkové uspořádání automobilu (z rodinného automobilu lze udělat dodávku, pick-up nebo kabriolet a naopak). V tomto případě bude již záležet pouze na kreativnosti designérů automobilů. Pasivní bezpečnost pro cestující v tomto automobilu, zatím není nijak zajištěna a bude řešena až v pozdější fázi vývoje. I když Hy-wire je pouze prototyp a předpokládaný nástup tohoto vozu na silnice, byl plánován na rok 2010, při dnešní finanční krizi a velmi pomalému schvalovacímu řízení úřadů a samotné možnosti infrastruktury, je tento termín nereálný. Úprava benzinových pump pro čerpání vodíku je velmi nákladná, dlouhé testování a ladění všech chyb v systému řízení a v neposlední řadě lobbing velkých ropných korporací, zatím neumožňují tomuto vozu opustit testovací okruhy a přejít do normálního provozu. Dnes v roce 2010 nebyl zatím vyroben jediný sériový vůz a ani výrobní linky zatím nejsou připraveny pro výrobu tohoto vozidla. Reálné odhady pro počátek sériové výroby a rozšíření automobilu mezi běžné uživatele jsou okolo roku 2018. Pokud se tak stane na silnice vyjede ekologický vůz, který za provozu nebude znečišťovat životní prostředí a bude téměř bezhlučný. Druhá stránka věci je, zda bude běžný uživatel ochoten investovat peníze do nové technologie a zda se bude ochoten učit novému způsobu řízení automobilu [6].



Obr. 3 Interiér vozu Hy-Wire [6]

²Citace z proslovu [11]

Existuje řada dalších automobilových konceptů využívající technologii drive-by-wire. Například automobil The Sequel pocházející od Firmy GM zobrazený na Obr.4 Jedná se o sportovně užitkový vůz poháněný palivovými články a představen byl na mezinárodním automobilovém veletrhu v Detroitu v roce 2005. Zrychlení automobilu z 0 na 100 km/h je okolo 10 sekund a poskytuje velmi vysokou úroveň kontroly vozidla na nerovném terénu, sněhu nebo ledu a velmi rychlou deceleraci [7].



Obr. 4 The Sequel [7]

Od firmy Mazda pochází koncept Mazda Ryuga představený 2007 v Detroitu. Tento koncept na rozdíl od The Sequelu používá 2,5litrový benzinový motor s šestistupňovou automatickou převodovkou (Obr.5) [8].



Obr. 5 Mazda Ryuga [8]

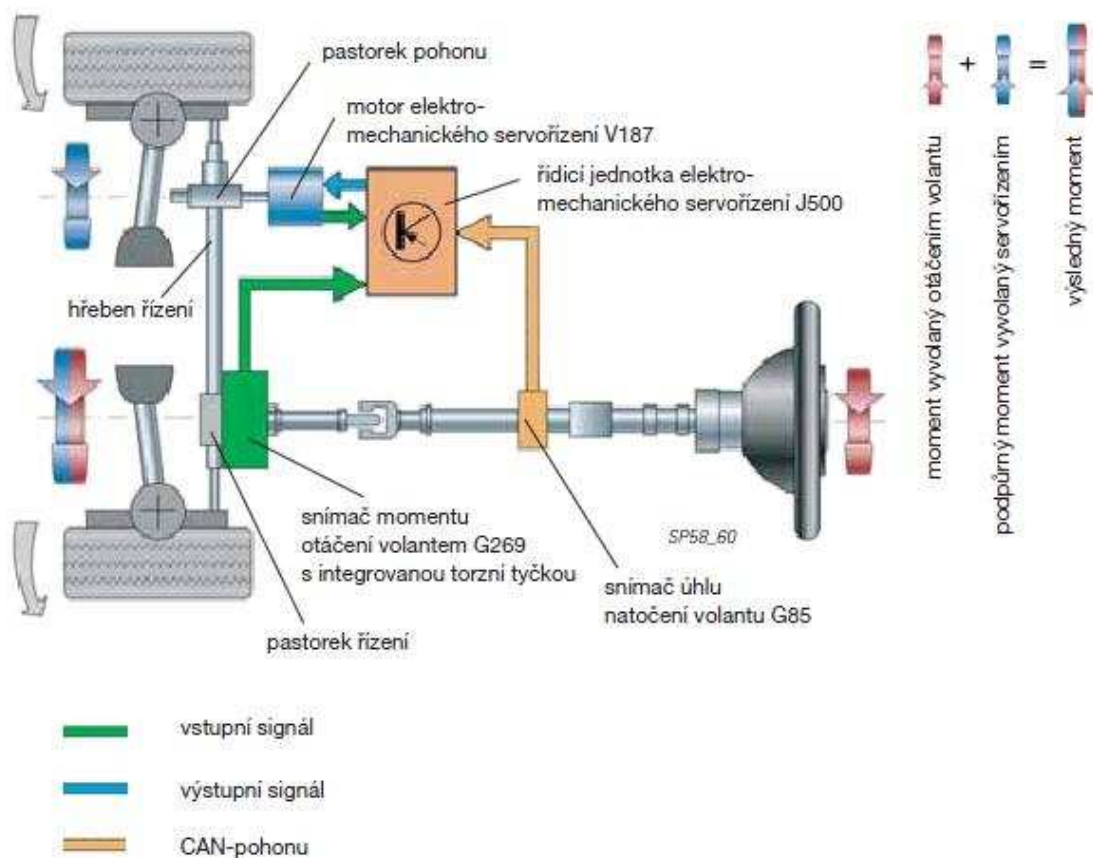
Další koncepty, jako jsou například ThyssenKrupp nebo PRESTA, se spíše liší v designovém pojetí, nežli v samotném systému drive-by-wire [4].

4. Elektromechanické servořízení u automobilu Škoda

Škoda používá elektromechanické servořízení s dvěma pastorky (pastorek řízení a pastorek pohonu). Tato metoda má na rozdíl od hydromechanického systému několik výhod. Odpadla potřeba hydraulických součástí jako čerpadlo servořízení, hydraulické vedení, zásobní nádržka na hydraulický olej (tedy i potřeba hydraulického oleje), zmenšil se zástavbový prostor (všechny součásti pro posilování řízení jsou umístěny přímo na převodovce servořízení) a snížila se hladina hluku. U hydraulického servořízení je za chodu motoru neustálá potřeba dopravovat do hydraulického okruhu hydraulický olej, ale u elektromechanického servořízení je energie spotřebována pouze, dochází-li k otáčení volantu. Tím je ušetřena jak elektrická energie, tak i palivo. Výhody tohoto systému spočívají ve vracení kol do přímého směru, které je aktivně podporováno elektromechanickým servořízením, řízení nepřenáší nepříjemné reakce do volantu při jízdě na nerovném povrchu a reakce na otáčení volantu je přímá a jemná. Toto servořízení je schopno fungovat i při vlečení vozidla (pokud je rychlost vlečení vyšší než 7 km/h, zapalování musí být zapnuté a akumulátor je dostatečně nabitý).

Hřídel volantu je výškově (v rozsahu 0-50 mm) i délkově (v rozsahu 0-60 mm) mechanicky nastavitelná. Zajištění hřídele volantu je provedeno soustavou deseti ocelových lamel. Pět lamel s podélným vedením umožňuje délkové nastavení a zbylých pět lamel s příčným vedením umožňuje výškové nastavení hřídele volantu. Sevření těchto lamel se dosahuje pomocí dvou rolen, které se pootočením dostanou z drážky a tlačí na přítlačnou desku, která lamely sevře. Protože není v mechanismu nastavování použito ozubení, je možno hřídel zaaretovat v libovolné pozici [9].

4.1 Princip řízení



Obr. 6 Systém řízení [9]

Při natočení volantu dochází ke zkroucení torzní tyčky integrované ve snímači momentu G269, který moment tohoto natočení zaznamená a vyšle o něm signál řídicí jednotce elektromechanického servořízení J500. Snímač polohy G85 informuje tuto jednotku jak o aktuálním úhlu natočení, tak i rychlosti tohoto natočení. Řídicí jednotka elektromechanického servořízení pak na základě údajů o momentu vyvolaném natočením volantu, rychlostí tohoto natočení, rychlosti vozidla, otáčkách motoru, úhlu natočení volantu a na základě charakteristik, které jsou v ní uloženy, stanoví velikost momentu, který musí vyvolat motor elektromechanického servořízení (tzv. podpůrný moment). Výsledný moment, který působí na ozubenou tyč, je dán součtem momentu podpůrného a momentu vyvolaného otáčením volantu.

Přestane-li řidič volantem otáčet, je moment vyvolaný otáčením volantu roven nule (krouticí moment nepůsobí ani na torzní tyčku snímače G269).

Díky geometrii nápravy vznikají na natočených kolech vnější síly, které působí proti směru natočení (snaží se kola vrátit do původní polohy). Tyto síly jsou však velmi malé a většinou nepřekonají ani tření v mechanismu řízení. Proto řídicí jednotka J500 stanoví ze vstupních veličin a uložených charakteristik velikost podpůrného vratného momentu, který vyvine motor elektromechanického servořízení V187 a kola se vrátí do přímého směru.

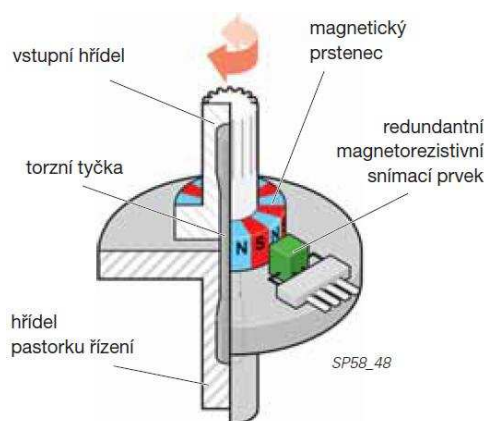
V nouzové situaci (pokud akumulátor nemá dostatečné napětí) zajistí elektromechanickému servořízení dostatek proudu při běžícím motoru centrální řídicí jednotka vozu J519, tím že vypne elektrické spotřebiče s nižší prioritou [9].

4.2 Elektronika servořízení

4.2.1 Snímač momentu otáčení volantem G269

Snímač pracuje na magnetorezistivním jevu, tedy na změně odporu vodiče působením magnetického pole. Má dva samostatné obvody pro zvýšení spolehlivosti. Na vstupní hřídeli je umístěn magnetický prstenec s celkem 24 póly magnetů a pro určení momentu se užívá vždy dvou pólů (Obr.7). Naproti magnetickému prstenci je umístěn magnetorezistivní snímací prvek spojený s hřídelí pastorku řízení. Při otočení volantem dojde k pootočení hřídelí a dojde také ke změně vzájemné polohy magnetického prstence a magnetorezistivního snímacího prvku. Tímto způsobem změříme velikost momentu.

Při poruše obou obvodů snímače G269 dojde k pozvolnému vypnutí posilovače řízení (pozvolnému, protože při výpadku tohoto snímače řídicí jednotka použije snímač natočení G85 a dopočítá příslušný moment). Při výpadku pouze jednoho obvodu snímač dále funguje bez omezení.



Obr. 7 Snímač momentu otáčení volantu G269 [9]

4.2.2 Snímač úhlu natočení volantu G85

Snímač je usazen na sloupku řízení mezi přepínačem pod volantem a volantem. Vysílá dva signály. Jeden o úhlu natočení a druhý o rychlosti tohoto natočení. Oba signály nejprve zpracuje řídicí jednotka elektroniky sloupku J527 a následně je vyšle do řídicí jednotky elektromechanického servořízení J500. Snímač úhlu se skládá z kódovacího kotouče se dvěma kódovacími prstenci (jeden absolutní a druhý inkrementální) a ze sedmi světelných závor, přičemž každá je tvořena vždy jedním zdrojem světla a jedním optickým snímačem. Inkrementální prstenec je rozdělen do pěti segmentů s úhlem 72° a je snímán světelnou závorou. V každém z těchto segmentů jsou různě široké díry, resp. různě široké pro každý segment, ale v rámci jednoho segmentu jsou stejně široké. Tím je dáno kódování segmentů. Úhel natočení určuje absolutní prstenec, který je snímán šesti světelnými závorami. Inkrementální snímač funguje na principu průchodu / stínění zdroje světla skrz inkrementální prstenec. Vně prstence se nachází zdroj světla, uvnitř optický snímač. Při průchodu světla vzniká na optickém snímači napětí, při stínění nikoli. Otáčením prstence vzniká série signálních napětí. Na stejném principu funguje i absolutní snímač. Signály jsou zpracované řídicí jednotkou a J527 a vzájemně porovnány, čímž je možno dopočítat pootočení kódovacího kotouče. Maximální možný úhel pro změření je $\pm 1044^\circ$ a snímač rozpozná úplná natočení volantem (360°) a úhly stále přičítá (maximální rozsah měření je $\pm 2,9$ otočení volantem).

Při výpadku snímače se aktivuje nouzový program. Chybějící signály jsou nahrazeny signály náhradními a posilování řízení zůstává zachováno.

4.2.3 Motor elektromechanického servořízení V187

Jedná se o asynchronní motor (bez kartáčů, rychlost rotoru a rychlost magnetického pole statoru jsou nestejně) s maximálním krouticím momentem 4,1 Nm sloužící pro posilování řízení. Elektromotor je umístěn v hliníkové skříni a posilující síla se z něj na hřeben řízení přenáší hřídelem přes šnekový převod a pastorek pohonu. Na druhé straně rotoru je umístěn magnet, který slouží pro měření otáček motoru elektromechanického servořízení. Při výpadku energie je možné s asynchronním motorem otáčet. Pokud tedy dojde k výpadku posilování řízení, je možno za použití větší síly nadále otáčet volantem. K blokaci motoru nedojde ani při zkratu.

4.2.4 Snímač otáček rotoru pro motor V187

Snímač je součástí motoru V187 a svou konstrukcí je prakticky shodný jako snímač momentu otáčení volantem G269. Při výpadku dojde k pozvolnému ukončení posilování řízení.

4.2.5 Rychlost vozidla

Informaci o rychlosti vozidla poskytuje řídicí jednotka systému ABS. Při výpadku je posilování nadále funkční, avšak bez servotronické funkce (tzn. bez funkce posilování řízení v závislosti na rychlosti vozidla).

4.2.6 Snímač otáček motoru G28

Jako snímač otáček se používá tzv. Hallův snímač (princip přerušování magnetického pole feromagnetickým kovovým rotačním kotoučem).

4.2.7 Řídicí jednotka J500

Pro ušetření kabeláže je tato jednotka upevněna přímo na elektromotoru V187. Na základě signálů o úhlu natočení otáčkách motoru, momentu natočení volantu, o otáčkách rotoru elektromechanického servořízení, rychlosti vozidla a zda je klíč v zapalování správně rozeznán, motor V187 zajišťuje dostatečně velký moment pro posilování řízení a dále vypočítá velikost potřebného budicího proudu pro motor V187. Součástí řídicí jednotky je i snímač teploty. Po překročení 100 °C se posilovací účinek plynule snižuje. Při výpadku této jednotky nebude již řízení nikterak posilováno, ale zůstane plně zachováno [9].

5. Návrh systému steer-by-wire

Pro přechod na systém steer-by-wire je nutno použít několik základních prvků a uspořádat je do funkčního celku. Jejich funkce a parametry budou podrobněji rozepsány v následujících kapitolách.

Snímače vstupních veličin

- Snímač momentu natočení volantu
- Snímač úhlu natočení volantu
- Snímač polohy přední nápravy (polohy hřebenu)
- Snímač polohy hřídele motoru pro natočení nápravy

Řídicí jednotka

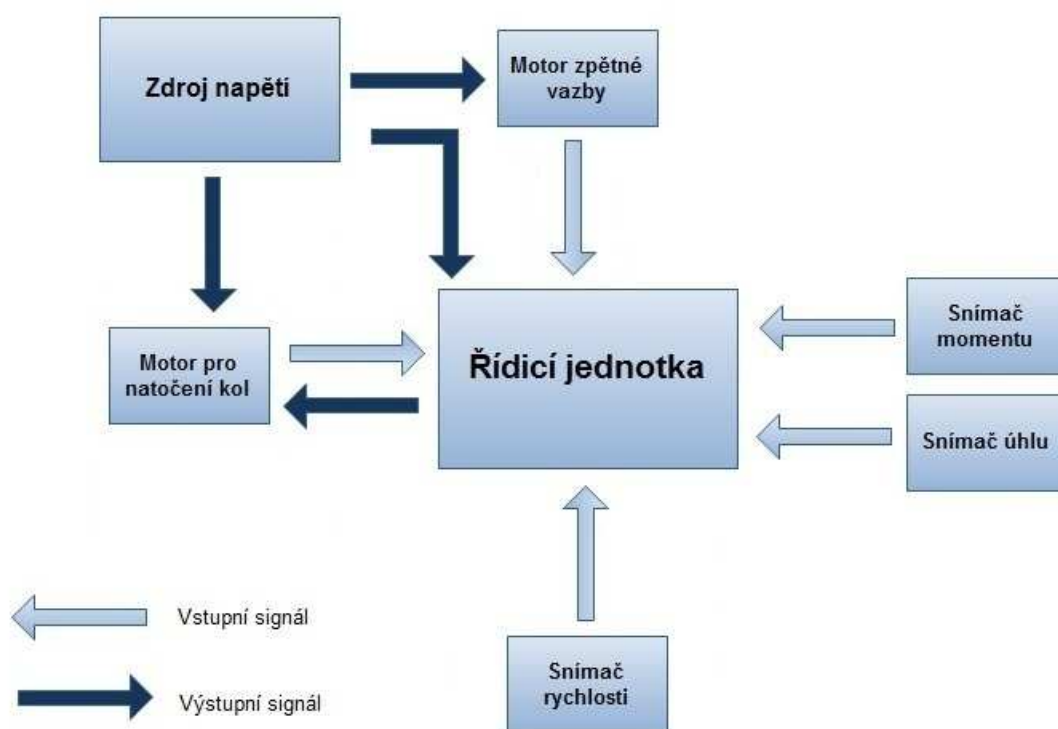
- Aktuální rychlost
- Výpočet optimálního momentu pro natočení kol
- Výpočet optimálního momentu pro motor zpětné vazby

Akční člen

- Elektromotor pro nastavení nápravy do požadované polohy
- Elektromotor zpětné vazby

Zálohování

- Záložní zdroj napájení
- Záložní motor pro natočení nápravy
- Záložní motor zpětné vazby
- Záložní elektronická řídicí jednotka
- Záložní snímač momentu natočení volantu
- Záložní snímač úhlu natočení volantu



Obr. 8 Návrh systému steer-by-wire

5.1 Koncepte systému steer-by-wire pro automobil Škoda

- Elektronická řídicí jednotka bude nahrazena, protože nyní pracuje s jedním motorem a s jedním senzorem navíc, proto bude nutné i její kompletní přeprogramování. Programové vybavení také musí obsahovat jízdní charakteristiky pro vyhodnocení různých jízdních situací.
- Na základě tohoto programu a vstupních veličin elektronická řídicí jednotka vygeneruje příslušný řídicí signály pro akční člen (elektromotor). Řídicí signály určují směr a rychlost otáčení elektromotorů.
- Elektromotor pro natočení kol je opatřen senzorem úhlu natočení pro snímání jeho aktuální polohy. Poloha kol bude navíc snímána senzorem polohy hřebenu. Tento senzor slouží ke kontrole správné funkce systému a vyhodnocení případných krizových situací.

- Na hřídeli hřebenové převodky řízení se nachází pastorek, který je pevně spojen s hřídelí elektromotoru sloužícího pro natočení kol. Otáčením pastorku dochází k posuvu ozubeného hřebenu a tím jsou vychylovány spojovací tyče mechanismu řízení a dochází k natáčení kol nápravy.

- Hřídel motoru zpětné vazby je spojovací tyčí přímo uchycena k volantů a tím dochází k automatickému otáčení volantů a kladení zpětného odporu řidiči při otáčení volantů.

5.2 Princip steer-by-wire

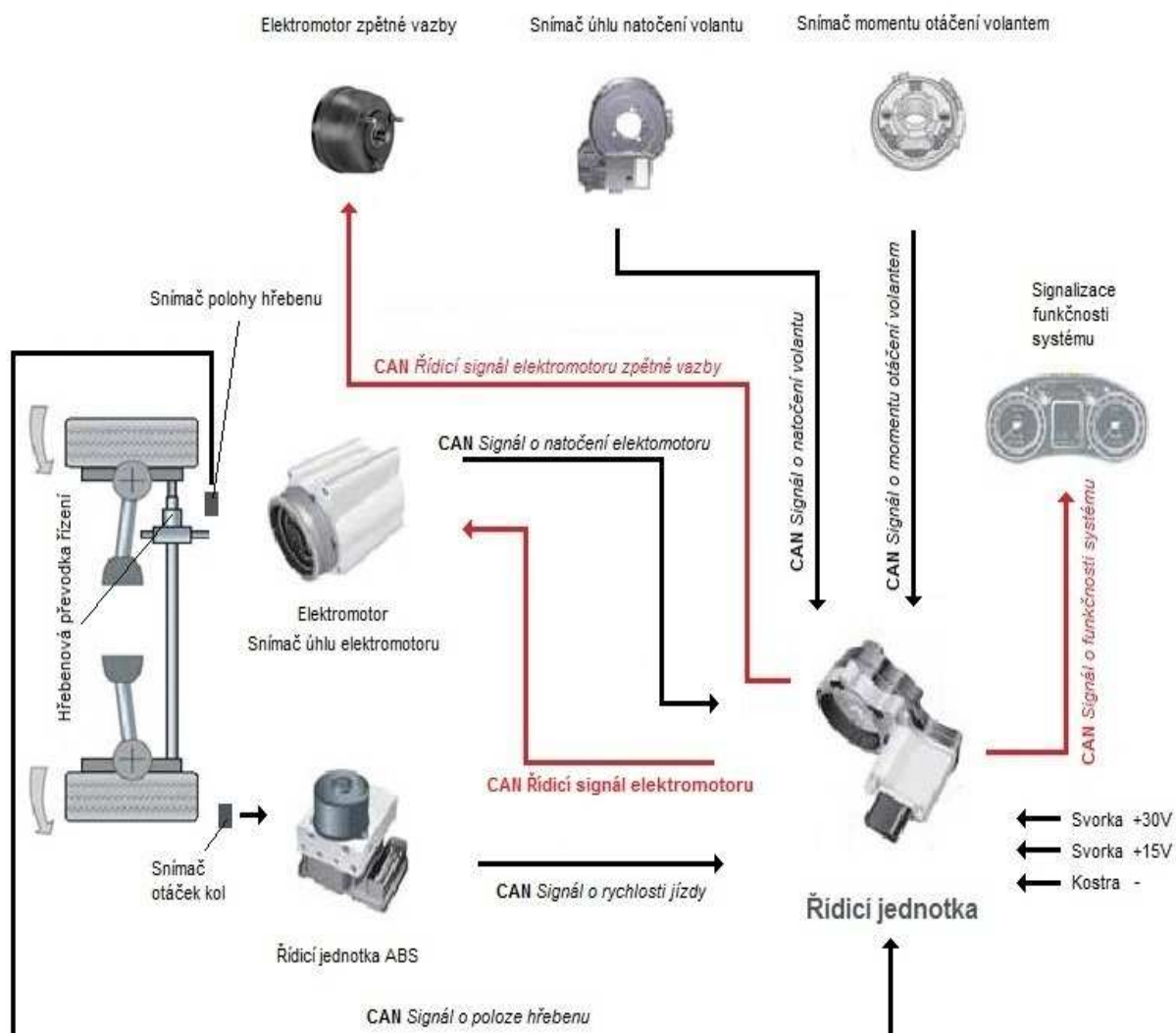
Při natočení volantů snímač natočení zaznamená tento moment a údaj je společně se silou, kterou bylo působeno přečten řídicí jednotkou. Další snímač informuje řídicí jednotku o aktuálním úhlu i rychlosti natočení. Řídicí jednotka na základě těchto údajů, informací ohledně jízdy (aktuální rychlost) a uložených charakteristik vypočítá velikost momentu, který je nutno provést elektromotorem pro natočení kol a momentu pro motor zpětné vazby, který klade odpor řidiči při otáčení volantem a vrací volant do nulové polohy. Momenty jsou převedeny na řídicí signály a vyslány do příslušných elektromotorů.

5.3 Funkce motoru zpětné vazby

Tento motor bude zařazen přímo pod volantem, za snímačem momentu a senzorem aktuálního natočení. Pokud dojde k otočení volantů, řídicí jednotka vypočítá jak moment pro natočení kol, tak i moment pro motor zpětné vazby. Motor zpětné vazby bude v určitých situacích klást jiný odpor.

Při vracení do původní polohy, nebo po puštění volantů je nutné, aby se volant i kola vrátily do nulové polohy. Řidič vozidla zcela pustí volant a snímač síly zaznamená nulu, kterou přečte i řídicí jednotka, situaci vyhodnotí a na základě úhlu natočení a uložených charakteristik vypočítá moment pro natočení kol i motor zpětné vazby. Samozřejmě se nesmí jednat o skokovou reakci motorů, spíše o postupný návrat do nulové polohy. Řídicí jednotka musí rozeznat, že se jedná o automatické vracení do původní polohy. Pokud bude řidič volantem otáčet zpět do původní polohy a volant zcela nepustí, snímač síly tento úkon zaznamená (zaznamená i jakou silou), zašle informaci do řídicí jednotky, která na základě údajů o momentu natočení a aktuální

poloze vypočítá moment pro oba motory. Po dosažení nulové polohy bude motor zpětné vazby klást větší odpor, aby informoval řidiče o dosažení nulové polohy.



Obr. 9 Schéma systému steer-by-wire pro automobil Škoda

5.4 Přejít na systém steer-by-wire u automobilu Škoda

5.4.1 Konstruktivní úpravy

Z konstrukčního hlediska byly provedeny tyto změny: odstraněna volantová tyč. Samotný volant a veškerou elektroniku je nutné uchytit, protože volant již nepodpírá volantová tyč.

5.4.2 Snímač úhlu natočení

Ponecháme optoelektronický snímač úhlu natočení G85 (viz kapitola 4.2.2 *snímač úhlu natočení G85*).

5.4.3 Snímač momentu natočení

Ponecháme magnetorezistivní snímač momentu otáčení volantem G269 (viz kapitola 4.2.1 *Snímač momentu otáčení volantem G269*).

5.4.4 Snímač polohy hřebenu přední nápravy

Pro snímání polohy hřebenu přední nápravy je nutné vybrat vhodný snímač. Lze vybírat z několika typů, které budou podrobněji rozepsány v následující kapitole. Snímač polohy hřebenu přední nápravy musí být velmi odolný vůči prachu, nečistotám, rázům a vibracím. Je vhodné použít snímač s malým výstupním zkreslením a velkou životností.

Snímače polohy lze rozdělit do několika skupin

- odporové
- ultrazvukové
- optické
- kapacitní
- indukční
- mechanické
- pneumatické a hydraulické
- magnetostrikční

Pneumatické a hydraulické snímače polohy se používají hlavně při pneumatických a hydraulických automatikách a je nutný převodník na elektrický signál. Pro snímání polohy hřebenu jsou nevhodné.

Snímače mechanické rozlišujeme jednoduché, pákové nebo vřetenové. Jejich výstupem je mechanická veličina, kterou by bylo nutné převést na veličinu elektrickou. Jsou velmi náchylné na vibrace a rázy. Při častém používání dochází k jejich velkému

opotřebení, proto jsou mechanické snímače pro snímání polohy hřebenu a aplikaci do systému steer-by-wire nevhodné.

Ultrazvukové snímače polohy měří dobu, za jakou přijmou ozvěnu ultrazvukových pulzů generovaných vysílačem a odražených od měřeného předmětu. Jsou spíše vhodné pro měření větších vzdáleností v prostoru, nebo měření výšky hladiny. Při znečištění snímače dochází ke špatnému vyhodnocení, nebo k úplné nefunkčnosti snímače, proto jsou pro aplikaci na měření polohy hřebenu nevhodné.

Optické snímače mohou být absolutní, inkrementální nebo limitní. Princip je založen na odrazení či průchodu (popř. absorpci) světelného paprsku mezi vysílačem a přijímačem snímače. Tyto snímače jsou spíše vhodné pro sledování kruhového pohybu. Při velkém znečištění prachem nebo nečistotami, může dojít ke špatnému vyhodnocení, proto jsou pro sledování polohy hřebenu nevhodné.

Kapacitní snímače polohy pracují na principu kondenzátoru s proměnou kapacitou. Kapacitní snímače využívají změny účinné plochy elektrod, změny jejich vzdáleností nebo změny dielektrika. Nevýhodou kapacitních snímačů je poměrně obtížné měření kapacity. Změny kapacit jsou malé a jejich měření vyžaduje použití citlivých měřících metod. Měří se při střídavém napájecím napětí s kmitočtem řádově až několik MHz. Měřicí obvod obvykle vyžaduje střídavý generátor a střídavý měřicí zesilovač. Z důvodu složitého měření kapacity jsem tento snímač nevybral [19].

Indukční snímače polohy patří mezi bezkontaktní snímače. Pracují na principu převodu polohy na změnu vlastní indukčnosti, případně vzájemné indukčnosti.

Indukční snímače lze rozdělit do tří skupin

- Indukční snímač s otevřeným magnetickým obvodem je tvořen vzduchovou cívkou, do které se zasouvá magneticky vodivé jádro a tím se mění permeabilita dutiny cívky. Původně malá vodivost magnetického obvodu se zvětšuje.
- Indukční snímač s uzavřeným magnetickým obvodem je tvořen tlumivkou s uzavřeným magnetickým jádrem, vodivost magnetického obvodu se mění změnou vzduchové mezery. Protože magnetická vodivost vzduchu v porovnání s magnetickou vodivostí feromagnetického materiálu magnetického obvodu je výrazně menší, zařazením vzduchové mezery do magnetického obvodu se rychle

zvětší magnetický odpor snímače. Magnetický odpor železa je pak zanedbatelný a indukčnost snímače je dána především magnetickou vodivostí vzduchové mezery.

- Diferenciální indukční snímač polohy se skládá ze dvou jednoduchých snímačů (s otevřeným nebo uzavřeným magnetickým obvodem) uspořádaných tak, že pracují proti sobě. Jestliže se při změně měřené polohy indukčnost jednoho snímače zvětší, indukčnost druhého se zmenší a naopak [19].

Indukční snímač polohy lze využít pro měření polohy hřebenu. Má malé výstupní zkreslení a jeho měření je velmi přesné. Tento snímač se však hodí spíše do laboratorních podmínek. Na přední nápravě jsou poměrně velké vibrace a velké množství nečistot by mohlo vést k jeho rychlému zničení, proto jsem nezvolil tento snímač.

Odporové snímače polohy mohou být spojitě nebo nespojitě. Nespojitě snímače polohy pracují na principu spínání a rozpojování kontaktů. Změna odporu mezi kontakty je nespojitá, hodnota odporu je buď nulová nebo nekonečná. Tyto snímače jsou pro měření polohy hřebenu nevhodné.

- Spojité odporové snímače jsou proměnlivé drátové rezistory, uspořádané tak, že měřená poloha nastavuje polohu jezce a tím mění odpor snímače. Podle zapojení rezistoru do měřicího obvodu rozlišujeme reostatové, nebo potenciometrové odporové snímače polohy.
- Reostatový snímač je do měřicího obvodu zapojen sériově, výstupním signálem obvodu je proud I . Průběh neprochází nulou a je nelineární, má tvar hyperboly. Proto se reostatový snímač málo používá.
- Potenciometrový snímač polohy je zapojen k měřicímu obvodu paralelně, výstupním signálem obvodu je napětí U . Rozlišujeme snímač nezatížený, je-li zatěžovací odpor R_z velmi velký, nebo snímač zatížený, je-li zatěžovací odpor R_z porovnatelný s odporem snímače R . Nelinearitu lze kompenzovat vhodným tvarováním průběhu odporu snímače (pro určitý odpor zatěžovacího rezistoru). Kromě chyby linearity, způsobené zatížením odporového snímače polohy, se vyskytuje přídavná chyba způsobená konstrukčním provedením snímače. Jezdec potenciometru se pohybuje po závitech drátového rezistoru, takže

výstupní napětí se nemění spojitě, ale po skocích odpovídajících napětí, které připadá na jeden závit. Průběh výstupního napětí pak není ideálně lineární, ale stupňový. Pohybuje-li se jezdec v rozsahu jednoho průměru drátu, výstupní napětí se nemění. Vzniká tak polohová necitlivost [19].

Odporové snímače polohy jsou poměrně přesné a mají velkou odolnost proti vibracím a nečistotám. Jejím hlavním nedostatkem je kontaktní způsob snímání, při němž mechanické opotřebení a dynamický přechodový odpor sběrače potenciometru vedou již po krátké době provozu k výraznému nárůstu nejistoty naměřené hodnoty. Dále mají poměrně velké zašumění výstupního signálu. Z důvodu zvyšování nejistoty naměřené hodnoty a velkému zašumění výstupního signálu (nutnost zařazení filtru) jsem tento snímač nezvolil.

Magetostrikční snímače polohy využívající k určení polohy a změření vzdálenosti kombinaci magnetomechanických jevů ve feromagnetickém materiálu a přesného měření doby šíření mechanického torzního impulsu (ultrazvukové vlny). Vyznačují se tím, že měří vzdálenost bezdotykově, přesně a s velkým rozlišením, spolehlivě a bez opotřebovávání i ve ztížených provozních podmínkách.

Základními částmi magnetostrikčního senzoru vzdálenosti jsou feromagnetický měřicí prvek tvaru tyče označovaný jako vlnovod (vede torzní ultrazvukovou vlnu k měniči impulsu) a posuvný permanentní magnet spjatý se sledovaným objektem, který vytváří ve vlnovodu podélné magnetické pole. Mezi posuvným permanentním magnetem (pracovní magnet ve funkci indikátoru polohy sledovaného objektu) a měřicím prvkem (vlnovodem) přitom neexistuje žádné přímé mechanické spojení. Při měření vysílá elektronika senzoru do vlnovodu krátké proudové impulsy, které vytvářejí proměnné magnetické pole radiálně působící okolo vlnovodu a šířící se s proudovými impulsy podél vlnovodu rychlostí světla. V místě, kde se radiální magnetické pole setkává s podélným magnetickým polem pracovního magnetu, dojde podle Wiedemannova jevu k mechanické torzní deformaci feromagnetického vlnovodu. Tím vznikne mechanický torzní impuls, který se šíří jako ultrazvuková vlna vlnovodem do místa vzniku k oběma jeho koncům. Na volném konci vlnovodu je pohlcen tlumícím obvodem, čímž se vyloučí případné rušivé vlivy na snímání signálu.

Na druhém konci vlnovodu (v hlavici snímače) zjišťuje příchod torzní vlny speciální měnič torzních impulsů, který se skládá z magnetostrikčního kovového pásu

spojeného s vlnovodem, z indukční snímací cívky a z pevného permanentního magnetu. Torzní vlna způsobí podle Villariho jevu změnu permeability kovového pásku. Ta se projeví časovou změnou magnetického pole pevného magnetu, která ve snímací cívce indukuje elektrický impuls. Protože se torzní vlna šíří vlnovodem konstantní ultrazvukovou rychlostí, lze vzdálenost mezi snímací cívkou a polohou pracovního magnetu snímače určit z doby, která uplyne mezi vysláním budícího proudového impulsu a vznikem elektrického impulsu ve snímací cívce měniče torzních impulsů (princip měření doby průletu - time-of-flight). Zjištěný rozdíl je možné přeměnit známými metodami na analogový nebo digitální výstupní signál ze snímače úměrný okamžité vzdálenosti pracovního magnetu od jeho výchozího (nulového) bodu, popř. rychlosti pohybu magnetu [18].

Magnetostrikční snímač polohy je nejvhodnější pro měření polohy hřebenu přední nápravy. Je velmi odolný proti nepříznivým vlivům jako jsou vibrace, prach, vlhkost, teplotní zátěž, opotřebení atd..

5.4.4 Lineární snímač polohy Temposonics EP

Temposonics EP je přesný bezkontaktní snímač lineární polohy. Snímač využívá magnetostrikční princip měření. Díky plně uzavřenému krytu lze snímač použít v prostředí zatíženém olejem a prachem.

Analogový výstup

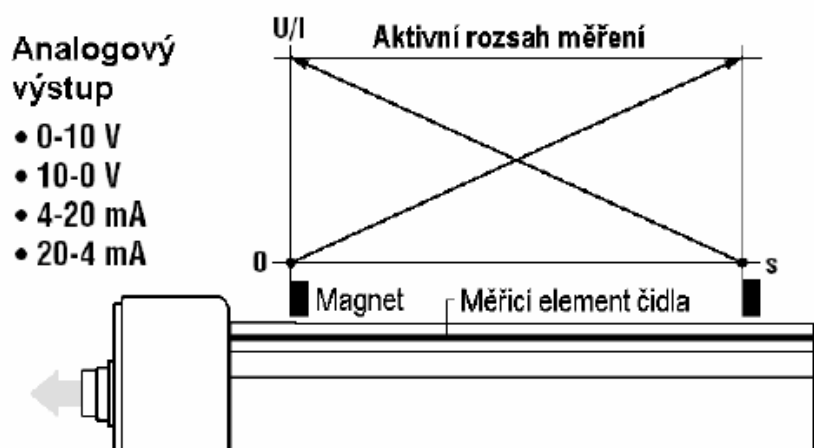
Snímač Temposonics EP s analogovým výstupem dává napěťový nebo proudový signál lineárně úměrný poloze snímacího magnetu vůči tělu snímače. Poloha nuly a konce rozsahu je pevná v plném aktivním rozsahu snímače a není třeba žádné další kalibrace.

Impulsní výstup Start / Stop

Snímač Temposonics EP s binárním výstupem má impulsní výstup Start / Stop. Snímač přijímá signál Start z externího řídicího systému a vysílá Stop signál, úměrný poloze snímacího magnetu. Čas mezi oběma signály je lineárně úměrný měřené poloze a je externí řídicí jednotkou použit pro stanovení polohy.



Obr. 10 Snímač Temposonics EP [17]



Obr. 11 Aktivní měřicí oblast snímače Temposonics EP [17]

5.5 Akční člen-elektromotor pro natočení kol

Pro natáčení kol je využito hřebenové řízení. Vstupní hřídel hřebenové převodky je natáčena akčním členem-elektromotorem. Otáčky elektromotoru způsobují vychýlení hřebenu do příslušného směru.

5.5.1 Řídící signály pro akční člen

Pomocí signálů od snímačů bude v řídicí jednotce zvolena vhodná charakteristika pro řízení. Vybraná charakteristika se následně transformuje na řídicí signál pro akční člen. Řídící signál představuje řetězec impulzů a má určenou hodnotu spouštěcího napětí, kterým je aktivován silový obvod s elektromotorem. Směr otáčení rozhoduje měnící se polarita napájení. Určitý počet otáček elektromotoru v daném směru pak odpovídá požadovanému úhlu natočení kol nápravy.

Instrukce předávané akčnímu členu musí být velmi přesné a samotné předávání musí probíhat velmi rychle. Díky současné elektronice je možnost snímat, vyhodnocovat a přiřazovat správné hodnoty až tisíckrát za vteřinu, což je rychlost dostačující.

5.5.2 Požadavky na elektromotor

Motor musí mít dostatečný výkon pro spolehlivé natočení předních kol a musí být zajištěn potřebný točivý moment pro překonání všech třecích odporů na předních kolech. Dynamika natáčení kol úzce souvisí s výkonem a otáčkami motoru. Jedním z důležitých aspektů jsou také přechodové oblasti motoru při rozběhu a brzdění. Motor musí dále splňovat požadavky na dostatečnou odolnost vůči nepříznivým vlivům a provozním podmínkám (odolnost vůči vlhkosti, prašnosti, vibracím, teplotě atd.). Energetická náročnost motoru musí být uzpůsobena možností napájení ze zdroje 12 V.

V současnosti používaný motor V187 (viz kapitola 4.2.3 *Motor elektromechanického servořízení V187*) bude nutno nahradit za motor výkonnější. Při odstranění volantové tyče eliminujeme moment, který vyvolá řidič působením na volant. Motor V187 nebude mít dostatečný výkon pro samostatné natočení kol. V krizových situacích, jako je zapření kola o obrubník při zatáčení kol, by došlo k jeho destrukci.

5.5.3 Návrh parametrů elektromotoru pro natáčení kol

Výpočet požadovaného momentu elektromotoru pro natáčení kol

Ke správnému fungování celého mechanismu řízení přední nápravy je nutný dostatečný moment elektromotoru sloužící pro natočení kol. Elektromotor musí překonat několik odporů působících jak na celý mechanismus, tak i na samotná kola. Především se jedná o moment vzniklý třením mezi kolem a vozovkou, vratný moment kol nápravy od příklonu čepu a momenty setrvačnosti všech pohyblivých částí mechanismu.

Celkový moment potřebný pro natočení kol

$$M = \frac{M_{tkol} + M_{tmech} + M_{vratny}}{i} \quad (1)$$

kde M_{tkol} je moment tření mezi koly a vozovkou

M_{tmech} je moment tření v mechanismu řízení

M_{vratny} je vratný moment od příklonu osy rejdového čepu

i je převodový poměr v převodovce elektromotoru

Výpočet vratného momentu od příklonu osy rejdového čepu

Maximální povolené zatížení přední nápravy: 911 kg

Maximální zatížení 1 kola: $F_{za} = 4555 \text{ N}$

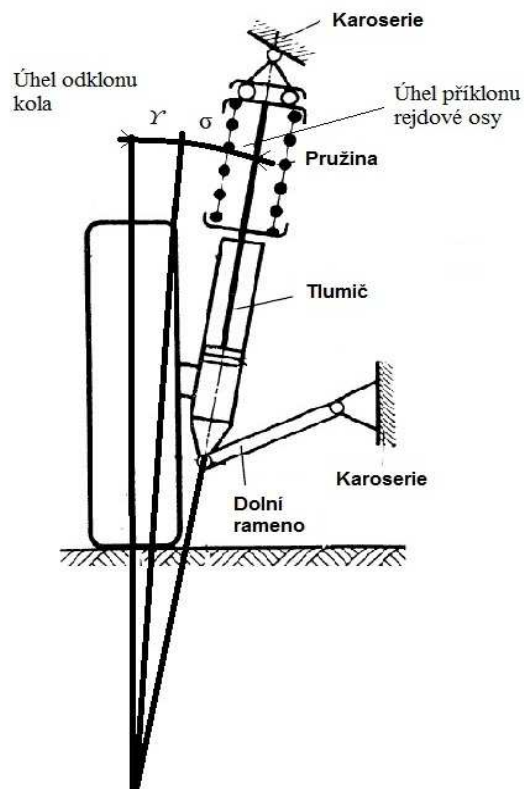
Úhel příklonu rejdové osy: $\sigma = 5^\circ$

Maximální úhel natočení kola: $\alpha = 30^\circ$

Dynamický poloměr kola: $r_d = 311 \text{ mm} = 0,311 \text{ m}$ (kolo 17 palců)

Poloměr rejdu: $r_o = 60 \text{ mm} = 0,06 \text{ m}$

Převodový poměr převodky: $i = 40$ (viz *Převodovka elektromotoru*)



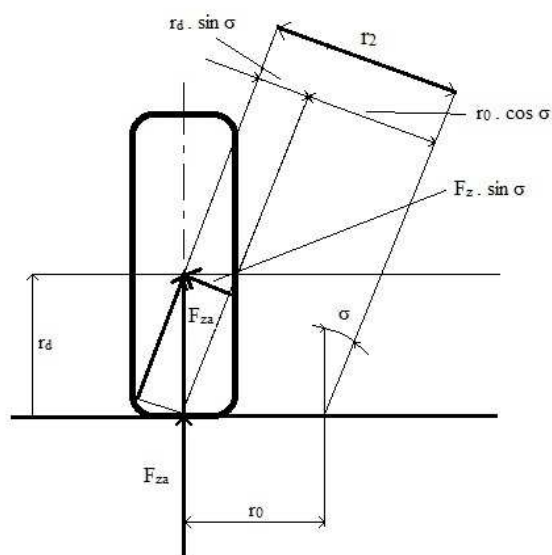
Obr. 12 Určení úhlu příklonu rejdové osy [16]

Rameno působícího vratného momentu:

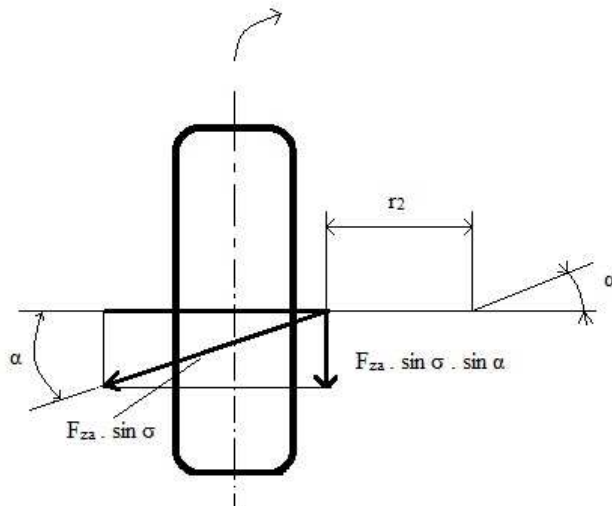
$$r_2 = r_d \cdot \sin \sigma + r_0 \cdot \cos \sigma \quad (2)$$

$$r_2 = 0,311 \cdot \sin 5^\circ + 0,06 \cdot \cos 5^\circ$$

$$r_2 = 0,087m$$



Obr. 13 Určení vratného momentu vlivem příklonu rejdové osy



Obr. 14 Určení vratného momentu vlivem příklonu rejdové osy

Vratný moment kola od příklonu rejdové osy

$$M_{vrat} = F_{vz} \cdot \sin \sigma \cdot \sin \alpha \cdot r_2 \quad (3)$$

$$M_{vrat} = 4555 \cdot \sin 5^\circ \cdot \sin 30^\circ \cdot 0,087$$

$$\underline{M_{vrat} = 17,269 Nm}$$

Celkový vratný moment kol přední nápravy

$$M_{vratny} = 2 \cdot M_{vrat} = 2 \cdot 17,269 = \underline{34,538 Nm}$$

Výpočet momentu od tření kol s vozovkou

Maximální moment tření mezi koly a vozovkou vzniká při nulové rychlosti, kdy dochází k největšímu kontaktu mezi dotykovou plochou pneumatiky a vozovkou. Orientačně můžeme počítat s hodnotou koeficientu tření mezi pryží pneumatiky a suchým asfaltem $\mu_1 = 0,20$. Odvalováním kol se tření značně snižuje a při vyšších rychlostech je jeho hodnota blízká nule tedy zanedbatelná.

$$M_{tkol} = 2 \cdot \mu_1 \cdot F_{zk} \cdot r_0 = 2 \cdot 0,2 \cdot 4555 \cdot 0,06 = \underline{109,32 Nm} \quad (4)$$

Výpočet momentu od tření v mechanismu řízení

Tření v mechanismu řízení je zanedbatelné, pokud je celý systém vhodně promazán. Při použití současněho systému použitého v systému automobilu Škoda je tření minimalizováno. Hodnotu koeficientu tření v mechanismu je pak $\mu_2 = 0,01$. Střední průměr čepu volím 25 mm .

$$M_{mech} = 2 \cdot \mu_2 \cdot F_{zk} \cdot d_{str} = 2 \cdot 0,01 \cdot 4555 \cdot 0,025 = \underline{\underline{2,275Nm}} \quad (5)$$

Celkový moment potřebný k natočení kol do maximálního úhlu rejdu

Jedná se o tři hodnoty

- A při nulové rychlosti jízdy
- B při jízdě
- C moment potřebný k natočení kol do nulové polohy (přímý směr)

A Při nulové rychlosti jízdy (maximální hodnota momentu-největší tření mezi koly a vozovkou).

$$M = \frac{M_{kol} + M_{mech} + M_{vratny}}{i}$$
$$M = \frac{109,32 + 2,275 + 34,539}{40} = \underline{\underline{3,653Nm}}$$

B Při jízdě (hodnota momentu mezi kolem a vozovkou je zanedbatelná)

$$M = \frac{M_{mech} + M_{vratny}}{i} = \frac{2,275 + 34,539}{40} = \underline{\underline{0,92Nm}}$$

C K natočení kol do nulové polohy (přímý směr)

$$M = \frac{M_{mech} - M_{vraty}}{i} = \frac{2,275 - 34,539}{40} = \underline{\underline{-0,807 Nm}}$$

Maximální moment potřebný pro natočení kol vzniká při stojícím vozidle, kdy je tření mezi vozovkou a koly největší a jeho hodnota dosahuje $M = 3,653 Nm$. Při pohybu automobilu je hodnota tření mezi koly a vozovkou zanedbatelná a hodnota momentu potřebná k natočení kol je mnohem nižší $M = 0,92 Nm$. Při návratu kol do přímého směru jízdy (do nulové polohy) vzniká záporný moment, protože geometrie kol a působení vnější síly, rovnají kola do nulové polohy $M = -0,807 Nm$ [16].

Výpočet momentu potřebného k natočení kol vychází z hodnot geometrie automobilu Škoda Octavia. Přesto se hodnoty u automobilů Škoda Octavia můžou lišit (různé druhy pneumatik a velikosti kol atd.). Jedná se o výpočet pro maximální zatížení přední nápravy a pro přesné určení hodnot je nutné provést měření přímo na automobilech Škoda při různých podmínkách měření, jako je nerovnoměrné zatížení vozidla, vliv povětrnostních podmínek, různé povrchy vozovky atd..

Pro dosažení požadovaného momentu, který musí vyvolat elektromotor pro natočení kol, jsem použil kombinaci napěťového měniče, elektromotoru a převodovky elektromotoru. Napěťový měnič změní napájecí napětí elektromotoru, který přes převodovku vyvolá dostatečný moment pro natočení kol. Převodovka sníží maximální moment, který musí vyvolat elektromotor pro natočení kol.

Napěťový měnič

Napěťový měnič je zařízení, které umožňuje měnit stejnosměrné napětí a proud na střídavé (tzv. střídač), nebo měnit hodnotu napětí. Obecně nejpoužívanější měniče napětí v automobilismu jsou měnič napětí z 12 V na 24 V, nebo měnič napětí (střídač) z 12 V (24 V) stejnosměrného na 230 V střídavého.

Pro napěťový měnič je doporučuje dvojnásobný výstupní výkon, než má připojený elektromotor. Připojený elektromotor má výkon 400 W, napěťový měnič by měl mít výstupní výkon 800 W.

Elektromotor

Accurax G5

Typ: SGMEV-04A

Výkon: 400 W

Otáčky: 3000 ot/min.

Maximální moment: 3,82 Nm

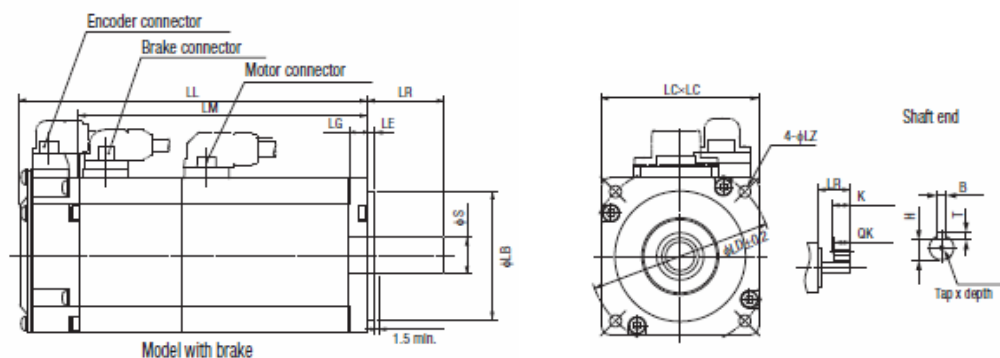
Napájení: 230 V

Inkrementální enkodér: 20bit

Krytí servomotoru: IP 67



Dimensions (mm)	Without brake		With brake		LR	Flange surface						Shaft End Dimensions								Approx. Mass Kg	
Model	LL	LM	LL	LM		LB	LC	LD	LE	LG	LZ	S	K	QK	H	B	T	Tap x Depth		Without brake	With brake
R88M-K20030(H/T)-□S2	79.5	56.5	116	93	30	50 ^{H7}	60	70	3	6.5	4.5	11 ^{H9}	20	18	8.5	4 ^{H9}	4	M4x8L		0.82	1.3
R88M-K40030(H/T)-□S2	99	76	135.5	112.5								14 ^{H9}	25	22.5	11	5 ^{H9}	5	M5x10L		1.2	1.7
R88M-K75030(H/T)-□S2	112.2	86.2	148.2	122.2	35	70 ^{H7}	80	90		8	6	19 ^{H9}		22	15.5	6 ^{H9}	6			2.3	3.1



Obr. 15 Rozměry servomotoru Accurax G5 SGMEV-04A [13]

Převodovka elektromotoru

Převodovka elektromotoru je připojena k motoru z důvodu dosažení vhodného točivého momentu. Vhodná šneková převodovka pro motor o výkonu 400W je Varvel MRT40.

Výstupní otáčky: 70 ot/s

Převodový poměr: 40

Výstupní moment: 34 Nm

Účinnost: 0,66



typ	i	n ₂	M _{k2}	P ₁	η _d
-	-	[min ⁻¹]	[Nm]	[kW]	[%]
(M)RT 40A	5	560	30	2	88
(M)RT 40A	7,5	373	31	1,38	88
(M)RT 40A	10	280	34	1,16	86
(M)RT 40A	12,5	224	33	0,91	85
(M)RT 40A	15	187	34	0,79	84
(M)RT 40A	20	140	33	0,6	80
(M)RT 40A	25	112	30	0,45	78
(M)RT 40A	30	93	36	0,49	72
(M)RT 40A	40	70	34	0,38	66
(M)RT 40A	50	56	33	0,31	63
(M)RT 40A	60	47	30	0,25	58
(M)RT 40A	70	40	29	0,23	52
(M)RT 40A	80	35	25	0,19	48
(M)RT 40A	100	28	24	0,15	47

Obr. 16 Rozměry a parametry šnekové převodovky Varvel MRT40 [14]

Výstupní otáčky z převodovky $n = 70$ ot/s

Rychlost otáčení výstupního hřídele převodovky

$$\omega = \frac{n \cdot 360}{60} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{70 \cdot 360}{60} = 480^\circ / s$$

Doba natočení předních kol do maximálního rejdu

$$t_m = \frac{\alpha \cdot i}{\omega} \quad (7)$$

kde α je maximální úhel rejdu kol

i je převodový poměr v převodovce elektromotoru

A Rychlost jízdy do 10km/h-maximální úhel rejdu kol $\alpha = 30^\circ$

(viz Řídicí charakteristika P1)

$$t_m = \frac{\alpha \cdot i}{\omega} = \frac{30 \cdot 40}{480} = \underline{\underline{2,5s}}$$

B Rychlost jízdy nad 130km/h-maximální úhel rejdu kol $\alpha = 26^\circ$

(viz Řídicí charakteristika P5-1)

$$t_m = \frac{\alpha \cdot i}{\omega} = \frac{26 \cdot 40}{480} = \underline{\underline{2,167s}}$$

Při použití servomotoru Accurax G5 a převodovky elektromotoru Varvel MT40 kola dosáhnou maximálního rejdu za čas 2,5 s. Z tohoto času budou vycházet charakteristiky pro automatický návrat volantu do nulové polohy.

5.6 Elektromotor zpětné vazby

Elektromotor zpětné vazby je umístěn přímo pod volantem za senzory momentu a úhlu natočení. Hřídel elektromotoru je přímo spojovací tyčí spojena s volantem. Otáčky elektromotoru budou klást odpor řidiči při otáčení volantem a zároveň při puštění volantu vrátí volant do nulové polohy.

5.6.1 Řídicí signály pro elektromotor zpětné vazby

Pomocí signálů od snímačů momentu a úhlu natočení bude v řídicí jednotce zvolena vhodná charakteristika pro kladení odporu řidiči. Vybraná charakteristika se následně transformuje na řídicí signál pro motor zpětné vazby. Bude se jednat o velké množství charakteristik pro různé jízdní situace. Moment, který vyvolá elektromotor pak klade odpor řidiči při otáčení volantem. Dále tento moment způsobí vrácení volantu do nulové polohy (přímého směru) při puštění volantu. Pokud však bude řidič při vracení do nulové polohy otáčet volantem, motor mu musí klást odpor v protisměru otáčení.

5.6.2 Požadavky na elektromotor

Motor musí mít dostatečný výkon pro kladení odporu řidiči a musí být zajištěn potřebný točivý moment pro překonání všech třecích odporů v systému řízení. Dynamika momentu bude úzce závislá na aktuální síle, kterou vyvine řidič na volant. Při pozvolném otáčení volantem bude motor klást mnohem menší odpor než při prudkém otočení volantem. Moment, který vyvolá motor zpětné vazby bude závislý na charakteristikách uložených v řídicí jednotce. Motor musí dále splňovat požadavky na dostatečnou odolnost vůči nepříznivým vlivům a provozním podmínkám (odolnost vůči vlhkosti, prašnosti, vibracím, teplotě, přetěžování motoru otáčením v protisměru samotného otáčení motoru atd.). Energetická náročnost motoru musí být uzpůsobena možnostem napájení ze zdroje 12 V.

5.6.3 Elektromotor zpětné vazby

TFD-40 050

Napájení: 12 V

Výkon: 42 W

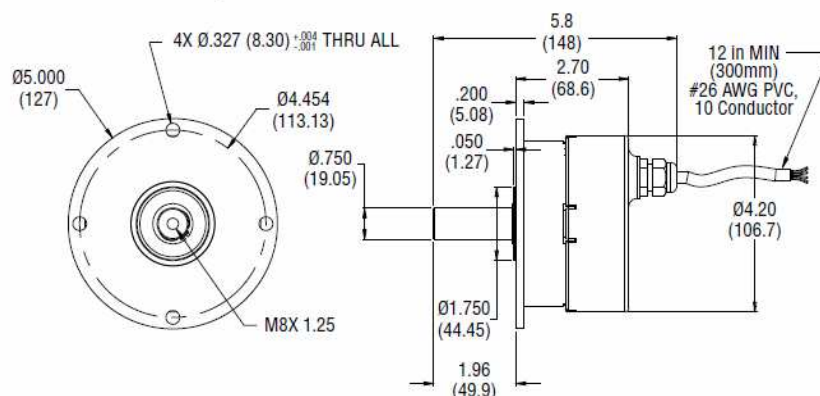
Moment: 5 Nm

Maximální otáčky : 120ot/s



TFD-40

Dimensions & Specifications



Obr. 17 Rozměry motoru zpětné vazby TFD-40 050 [15]

Tento motor je přímo určen pro aplikaci do systémů by-wire. Primárně je určen do vysokozdvížných vozíků, golfových vozíků, paletových vozíků, zametacích strojů, lodí a letadel.

5.7 Řídicí jednotka

Aktuální řídicí jednotka bude nahrazena jednotkou schopnou pracovat s jedním vstupem a jedním výstupem navíc než řídicí jednotka J500 (viz kapitola 4.2.7 Řídicí jednotka J500). Programové vybavení nové řídicí jednotky musí nově obsahovat charakteristiky na oba motory.

Hodnoty ze všech vstupních signálů jsou neustále vyhodnocovány v procesoru řídicí jednotky. Z hodnot snímačů umístěných pod volantem (snímač úhlu a momentu natočení volantu) bude vypočítán úhel i rychlost natočení volantu. Hodnoty od senzoru ABS je vypočítána rychlost. Obě tyto hodnoty jsou následně porovnány s hodnotami uloženými v řídicí jednotce a řídicí jednotka zvolí vhodné charakteristiky pro ovládání motorů (motoru zpětné vazby a motoru pro natočení kol). Signál od snímače polohy hřebenu nápravy informuje jednotku o správném natočení kol. Vhodné naprogramování řídicí jednotky je jedním z nejdůležitějších úkonů. Celý systém je velmi závislý na uložených charakteristikách. Pokud budou uložené charakteristiky špatně navrženy celý systém bude funkční, ale jeho chování nebude optimální a ovládání automobilu nebude příjemné a efektivní. Každá charakteristika musí být velmi důkladně otestována, zda odpovídá požadované jízdní situaci a musí mít svoji jednoznačnou identifikaci, aby nedošlo k náhodnému zaměnění charakteristik.

5.7.1 Funkce řídicí jednotky

Řídicí jednotka je primárně určena ke zpracovávání signálů od snímačů a získává tak hlavní vstupní veličiny :

- rychlost vozidla v
- úhel natočení volantu β
- rychlost natočení volantu v_v
- poloha hřídele motoru pro natočení nápravy α (úhel natočení předních kol)
- poloha hřebenu α_2 (slouží k ověřování funkčnosti systému)

Podle rychlosti jízdy, úhlu a rychlosti natočení volantu je pak vypočítána hodnota úhlu natočení předních kol pro jízdu v určitých rychlostech a rychlém či pomalém otáčení volantem. Řídicí jednotka poté vybere vhodnou charakteristiku a pomocí řídicích signálů provede příslušné natočení kol. Poloha hřídele motoru informuje jednotku o provedeném natočení. Snímač polohy hřebenu slouží ke kontrole správné funkčnosti motoru natočení.

5.7.2 Návrh řídicích charakteristik

Řídicí charakteristiky jsou rozděleny do dvou skupin pro rychlé a pomalé otáčení volantem (kromě charakteristik P0 a P1). Jako pomalé otáčení volantem jsem určil hodnotu $v_v \geq 0,75$ ot/s, tedy dosažení koncové polohy volantu za čas 2 s nebo vyšší. Rychlé otáčení volantem se považuje rychlost otáčení volantu $v_v < 0,75$ ot/s.

Řídicí charakteristika P0 pro přímý směr jízdy

Přímá jízda automobilu nevyžaduje žádný zásah řídicí jednotky. Elektromotor je v klidu.

Tabulka 1 Jízdní charakteristika P0

Charakteristika P0 pro přímý směr jízdy	
úhel natočení volantu	$\beta = 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v = 0$ ot/s
natočení předních kol	$\alpha = 0^\circ$
rychlost automobilu	$v > 0$ km/h

Charakteristiky pro zatáčení vpravo

Řídicí charakteristika P1 pro zatáčení vpravo pro rychlost automobilu $v < 10 \text{ km/h}$

Tato charakteristika vychází z velmi malé rychlosti vozidla. Je tedy vhodná pro rozjíždění či parkování vozidla, kde je kladen největší důraz na co největší manévrovatelnost s automobilem. Kola můžou dosáhnout největšího rejdu $\alpha = 30^\circ$ a nezáleží na rychlosti otáčení volantem, protože v této rychlosti jsou nepravděpodobné krizové situace.

Tabulka 2 Jízdní charakteristika P1

Charakteristika P1 pro zatáčení vpravo v malých rychlostech	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v > 0 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 30^\circ$
rychlost automobilu	$v < 10 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,5 \text{ s}$

Řídicí charakteristiky P2 pro zatáčení vpravo a rychlost automobilu $10 \leq v < 50 \text{ km/h}$

Charakteristiky P2 jsou vhodné do obcí a měst, kde je rychlost omezena na 50 km/h. V těchto charakteristikách již záleží na rychlosti otáčení volantem. Charakteristika P2-1 je určena pro rychlé otáčení volantem a kola dosáhnou úhlu natočení $\alpha = 29^\circ$. Při krizových situacích dojde k rychlejšímu natočení kol.

Tabulka 3 Jízdní charakteristika P2-1

Charakteristika P2-1 pro zatáčení vpravo a rychlé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v \geq 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 29^\circ$
rychlost automobilu	$10 \leq v < 50 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,417 \text{ s}$

Charakteristika P2-2 je určena pro pomalé otáčení volantem a kola dosáhnou úhlu natočení $\alpha = 27,5^\circ$. Dochází k pozvolnějšímu natočení kol pro pohodlnější a komfortnější zatáčení automobilu.

Tabulka 4 Jízdní charakteristika P2-2

Charakteristika P2-2 pro zatáčení vpravo a pomalé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v < 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 27,5^\circ$
rychlost automobilu	$10 \leq v < 50 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,292 \text{ s}$

Řídící charakteristiky P3 pro zatáčení vpravo a rychlost automobilu $50 \leq v < 90 \text{ km/h}$

Charakteristiky P3 jsou určeny pro jízdu mimo obec. Charakteristika P3-1 je určená pro rychlé otáčení volantem. Kola dosáhnou maximálního úhlu natočení $\alpha = 28^\circ$.

Tabulka 5 Jízdní charakteristika P3-1

Charakteristika P3-1 pro zatáčení vpravo a rychlé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v \geq 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 28^\circ$
rychlost automobilu	$50 \leq v < 90 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,333 \text{ s}$

Charakteristika P3-2 je určena pro pomalé otáčení volantem a kola dosáhnou úhlu natočení $\alpha = 25^\circ$.

Tabulka 6 Jízdní charakteristika P3-2

Charakteristika P3-2 pro zatáčení vpravo a pomalé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v < 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 25^\circ$
rychlost automobilu	$50 \leq v < 90 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,083 \text{ s}$

Řídící charakteristiky P4 pro zatáčení vpravo a rychlost automobilu $90 \leq v \leq 130 \text{ km/h}$

Charakteristiky P4 jsou určeny pro jízdu na dálnici. Charakteristika P4-1 je určená pro rychlé otáčení volantem. Kola dosáhnou maximálního úhlu natočení $\alpha = 27^\circ$.

Tabulka 7 Jízdní charakteristika P4-1

Charakteristika P4-1 pro zatáčení vpravo a rychlé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v \geq 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 27^\circ$
rychlost automobilu	$90 \leq v \leq 130 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,25 \text{ s}$

Charakteristika P4-2 je určena pro pomalé otáčení volantem a kola dosáhnou úhlu natočení $\alpha = 22,5^\circ$.

Tabulka 8 Jízdní charakteristika P4-2

Charakteristika P4-2 pro zatáčení vpravo a pomalé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v < 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 22,5^\circ$
rychlost automobilu	$90 \leq v \leq 130 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 1,875 \text{ s}$

Řídicí charakteristiky P5 pro zatáčení vpravo a rychlost automobilu $v > 130 \text{ km/h}$

Charakteristiky P5 jsou určeny pro jízdu na okruzích a pro jízdu v zemích s povolenou rychlostí vyšší než 130 km/h. Charakteristika P5-1 je určena pro rychlé otáčení volantem. Kola dosáhnou maximálního úhlu natočení $\alpha = 26^\circ$.

Tabulka 9 Jízdní charakteristika P5-1

Charakteristika P5-1 pro zatáčení vpravo a rychlé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v \geq 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 26^\circ$
rychlost automobilu	$v > 130 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,167 \text{ s}$

Charakteristika P5-2 je určena pro pomalé otáčení volantem a kola dosáhnou úhlu natočení $\alpha = 20^\circ$.

Tabulka 10 Jízdní charakteristika P5-2

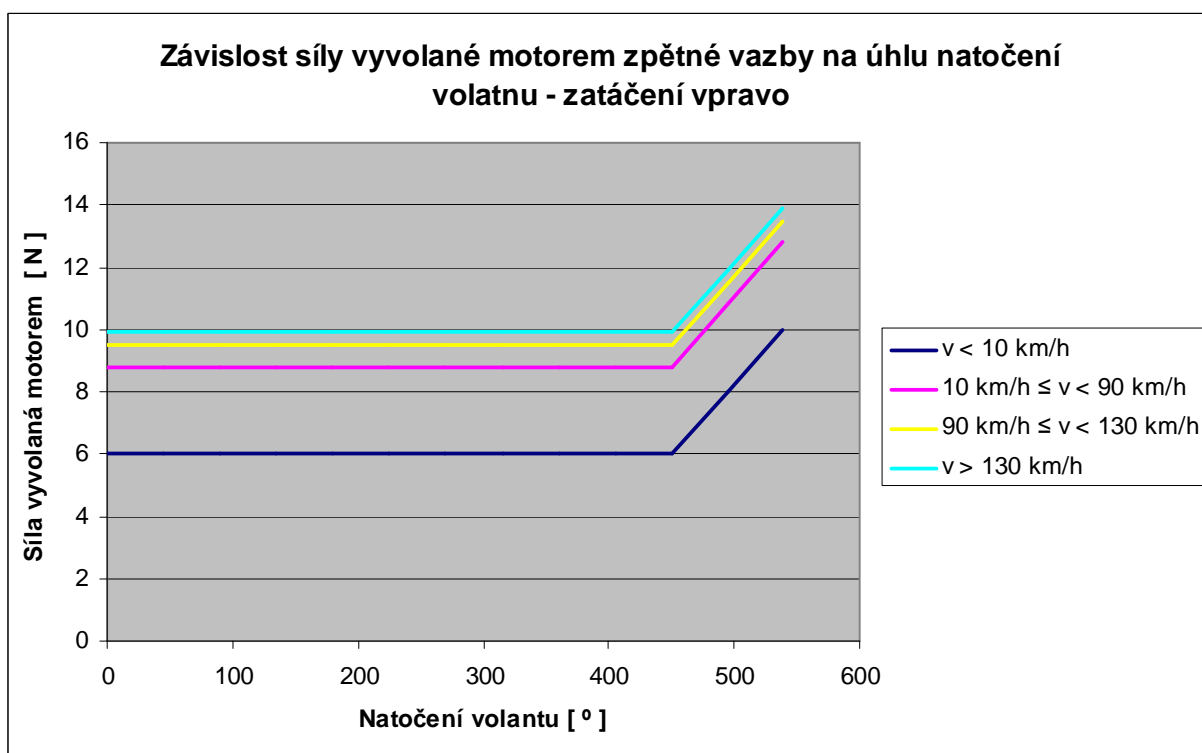
Charakteristika P5-2 pro zatáčení vpravo a pomalé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$0^\circ < \beta \leq 360^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v < 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$0^\circ < \alpha \leq 20^\circ$
rychlost automobilu	$v > 130 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 1,667 \text{ s}$

Charakteristiky pro zatáčení vlevo

Charakteristiky pro zatáčení vlevo jsou velmi podobné charakteristikám pro zatáčení vpravo, ale úhly natočení volantu β a úhly natočení kol α dosahují záporných hodnot od nulové polohy (viz Příloha č.5).

5.7.3 Charakteristiky pro motor zpětné vazby

Je vhodné, aby motor zpětné vazby kladl při různých jízdních situacích rozdílný odpor pro větší komfortnost při jízdě a větší bezpečnost. Při nízkých rychlostech je pro větší manévrovatelnost vozidla vhodnější klást nižší odpor, naopak při rychlostech vyšších je vhodnější použít řízení tužší, tedy s větším odporem kladeným řidiči při otáčení volantem.

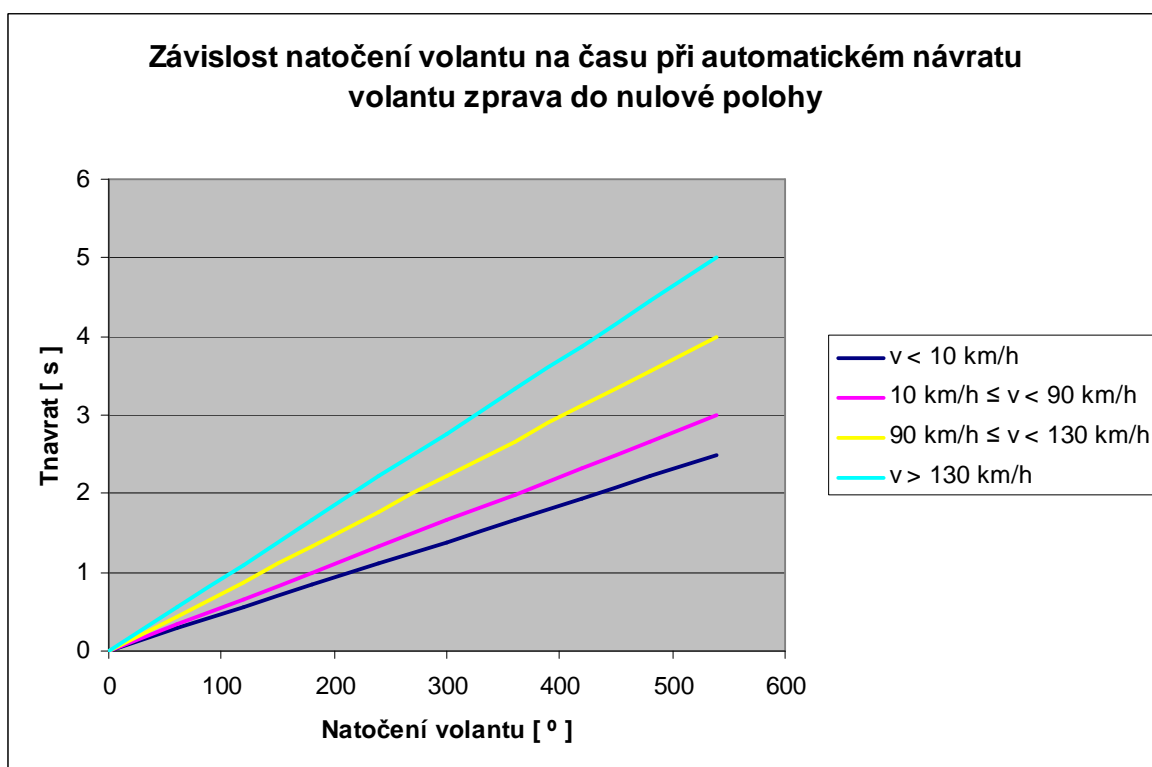


Graf 1 Závislost síly vyvolané elektromotorem zpětné vazby na úhlu natočení volantu pro zatáčení vpravo

Jak je vidět z Grafu 1 pro různé rychlosti automobilu elektromotor zpětné vazby vyvolá různé síly pro kladení odporu řidiči. Pokud se řidič začne přibližovat do konečné polohy volantu 540° motor začne klást větší odpor, aby informoval řidiče o blížící se konečné poloze.

Automatický návrat

Jedná se o situaci, kdy řidič zatočí volantem a po dokončení zatáčení zcela pustí volant. Snímač síly umístěný pod volantem zaznamená nulu a volant se automaticky vrátí do nulové polohy. Tento návrat musí být pozvolný. Celková doba návratu z maximálního úhlu natočení je závislá na rychlosti automobilu.

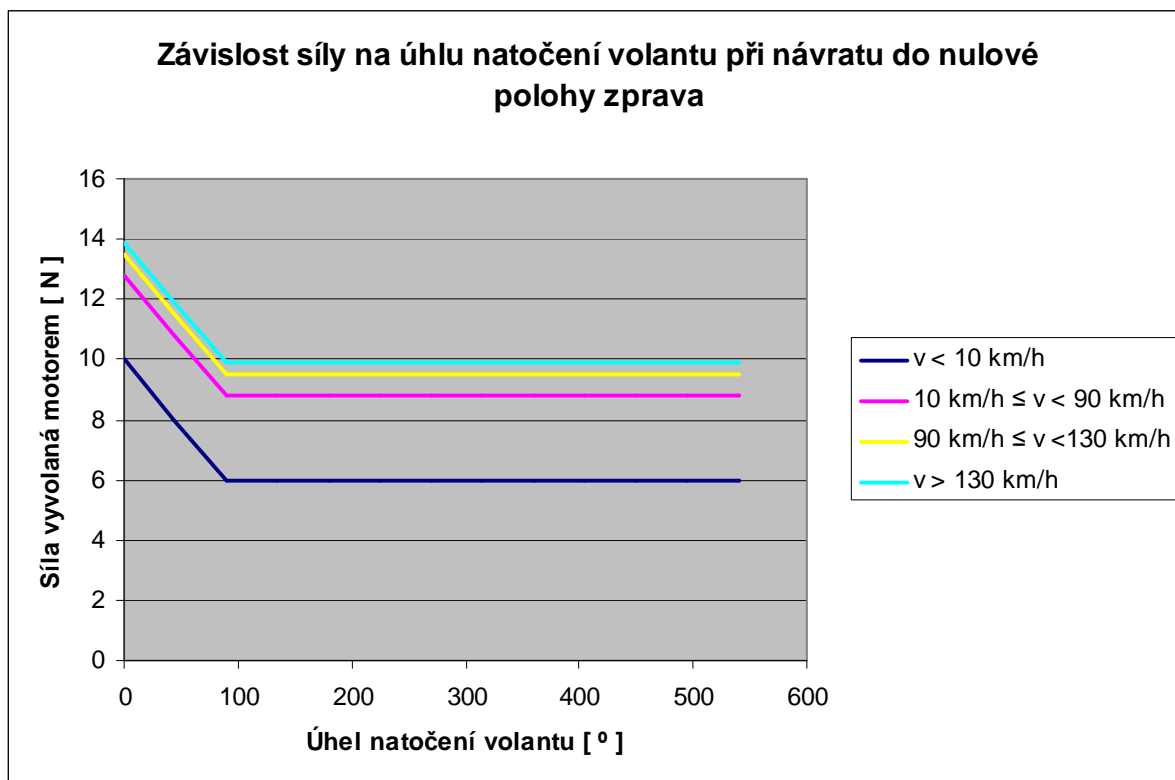


Graf 2 Závislost natočení volantu na času při automatickém návratu zprava do nulové polohy

Z Grafu 2 je vidět, že při nízkých rychlostech dojde k velmi rychlému návratu do nulové polohy, což zvyšuje manévrovatelnost vozidla na malém prostoru. Při vysokých rychlostech dochází k velmi pozvolnému automatickému návratu, aby nebyla ohrožena bezpečnost vozidla a nedošlo k jeho smyku.

Řidič působící silou

Jedná se o návrat volantu do nulové polohy při které působí řidič silou na volant ve směru návratu do nulové polohy. Tato situace nastane pokud řidič zatočí např. doprava a ihned poté začne otáčet volantem na opačnou stranu. V tuto chvíli musí dojít k velmi rychlé reakci motoru zpětné vazby, který začne okamžitě klást odpor v protisměru otáčení volantem při návratu do nulové polohy.



Graf 3 Závislost síly vyvolané elektromotorem zpětné vazby při návratu do nulové polohy při návratu zprava

Jak je vidět na *Grafu 3*, pokud bude řidič působit silou při návratu volantu do nulové polohy motor zpětné vazby bude klást stejný odpor, jako při zatáčení vpravo. Pokud se řidič přiblíží volantem k nulové poloze, motor zvýší sílu odporu, aby řidiče informoval o blížící se nulové poloze.

Charakteristiky pro motor zpětné vazby a otáčení volantem vlevo

Charakteristiky pro motor zpětné vazby při otáčení volantem vlevo a návratu zleva do nulové polohy jsou velmi podobné charakteristikám pro zatáčení vpravo, ale úhel natočení volantu α dosahuje záporných hodnot od nulové polohy (viz *Příloha č.6*).

6. Kritické poruchy

Kritické poruchy nastávají při výpadku jednoho či více senzorů, motorů, při výpadku řídicí jednotky nebo při výpadku elektrické energie.

6.1 Kritické poruchy senzorů

Porucha snímače úhlu natočení přední nápravy

Kontrola natočení kol je prováděna dvěma senzory. Jeden senzor je umístěn na hřídeli motoru, druhý je umístěn na hřebenu řízení. Při natočení kol řídicí jednotka porovná hodnoty z obou senzorů a pokud se hodnoty liší, je jeden ze senzorů nefunkční. Porovná hodnoty o úhlu natočení volantu a natočení kol s přiřazenou charakteristikou a na základě těchto údajů určí, který senzor je nefunkční. Senzor je vyřazen, jeho data již nejsou zpracovávány a řídicí jednotka informuje o závadě pomocí ukazatele na přístrojové desce. Automobil je schopen pokračovat v jízdě s jedním funkčním senzorem.

Porucha snímače úhlu natočení volantu

Informaci o natočení volantu doporučuji snímat dvěma senzory. Nový senzor umístěný na hřídeli motoru zpětné vazby slouží pro kontrolu správné funkčnosti optoelektronického snímače úhlu natočení G85 (viz 4.2.2 Snímač úhlu natočení G85). Řídicí jednotka obě hodnoty porovná a pokud se liší, jeden ze snímačů je nefunkční a řídicí jednotka informuje o závadě pomocí ukazatele na přístrojové desce. Pro tuto situaci navrhuji diagnostický program. Při zastavení vozidla řidič provede natočení volantu z nulové polohy do maximálního úhlu natočení (1,5 otáčky volantu) vpravo i vlevo. Snímač který zaznamená úhel natočení 540° a -540° je funkční. Druhý nefunkční senzor je vyřazen a jeho data nejsou dále zpracovávány. Automobil je schopen pokračovat v jízdě s jedním senzorem.

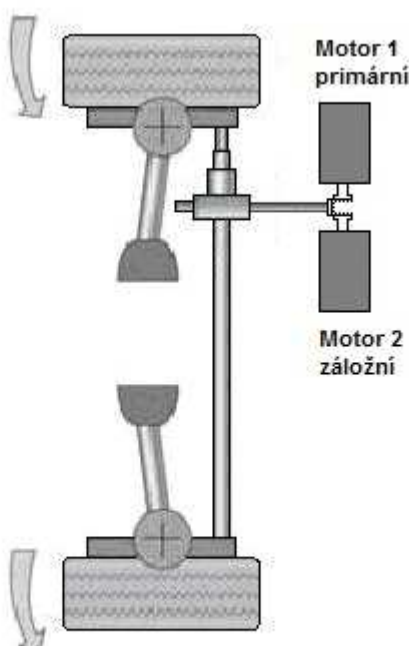
Porucha snímače momentu otáčení volantem

Při výpadku snímače momentu přestane elektronická řídicí jednotka dostávat informace o rychlosti natočení volantu a síle, kterou působí řidič na volant. V tomto případě nebudou využívány řídicí charakteristiky pro motor sloužící k natočení kol. U všech rychlostí bude použita jízdní charakteristika P1. V této charakteristice nezáleží na rychlosti otáčení volantem a kola dosahují maximálního rejdu. Řídicí jednotka informuje o poruše pomocí ukazatele na přístrojové desce a automobil je schopen pokračovat v jízdě.

6.2 Kritické poruchy motorů

Porucha motoru sloužícího pro natočení kol

Jako ochranu proti výpadku motoru sloužícího pro natočení kol navrhuji zapojení dvou protiběžných motorů umístěných proti sobě (Obr.18).



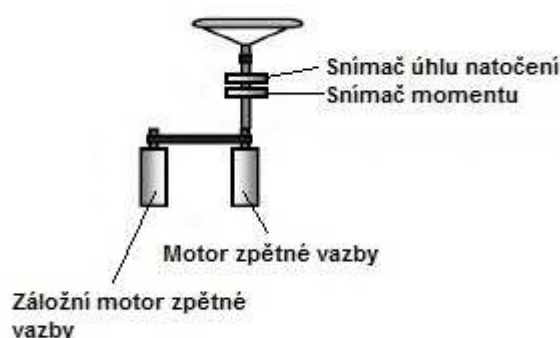
Obr. 18 Zapojení dvou protiběžných motorů

Hřídele obou motorů jsou pomocí ozubeného ústrojí spojeny a při zatáčení se mění poloha hřídele u obou motorů. Při výpadku motoru má poloha hřídele záložního motoru stejnou polohu jako motor primární, ale s opačným znaménkem. Řídicí jednotka

musí odesílat řídicí signály s opačnou polaritou. Záměna motorů musí probíhat velmi rychle za všech okolností včetně zatáčení. Řídicí jednotka primární motor odstaví a informuje o závadě pomocí ukazatele na přístrojové desce. Automobil je schopen pokračovat v jízdě.

Porucha motoru zpětné vazby

Motor zpětné vazby je přímo spojen s volantem. Motor záložní je umístěn vedle motoru primárního a hřídele obou motorů jsou propojeny hřebenovým náhonem.



Obr. 19 Zálohování motoru zpětné vazby

Při výpadku primárního motoru zpětné vazby jeho úkol přebírá motor záložní. Jeho reakce bude okamžitá, protože hřídele jsou pevně spojeny. Řídicí jednotka informuje o výpadku ukazatelem na přístrojové desce.

6.3 Kritická porucha zdroje napájení

Při výpadku zdroje napájení může dojít k výpadku systému. Proto je použit zdroj záložní, který je přímo zapojen do systému. Při výpadku primárního zdroje je energie ihned odebírána ze zdroje záložního, aby nedošlo k výpadku elektrické energie a zhroucení celého systému. Sekundární zdroj musí mít stejné parametry a umožňovat stejné odběry energie. Řídicí jednotka informuje o výpadku zdroje ukazatelem na přístrojové desce. Automobil je schopen pokračovat v jízdě.

6.4 Kritická porucha elektronické řídicí jednotky

Jedná se o nejnebezpečnější situaci, která vede k selhání celého systému. Ochranou před tímto fatálním selháním celého systému je použití záložní řídicí jednotky. Záložní jednotka je připojena přímo do systému a začíná fungovat ve stejný okamžik jako jednotka primární. V každý okamžik zpracovává stejné hodnoty a údaje jako jednotka primární a zároveň mezi sebou jednotky komunikují. Pokud dojde k výpadku primární jednotky její funkce okamžitě přebírá jednotka záložní a vykonává všechny funkce primární jednotky, informuje řidiče o výpadku primární řídicí jednotky a automobil je schopen pokračovat v jízdě. Pokud by došlo k výpadku sekundární jednotky, celý systém by selhal. Proto doporučuji použít třetí elektronickou řídicí jednotku, která se sepne až v okamžik výpadku sekundární řídicí jednotky. Z důvodu ceny doporučuji zjednodušenou verzi řídicí jednotky, která nebude používat řídicí charakteristiky (pouze řídicí charakteristiku P1) a nebude obsahovat samodiagnostické programy.

Všechny prvky systému steer-by-wire musí být minimálně dvakrát jištěny. Pro větší bezpečnost navrhuji u nezbytných součástí systému, jako jsou elektronická řídicí jednotka, jištění minimálně čtyřnásobné, stejně jako v systému fly-by-wire používaného v leteckém průmyslu. Tento krok je také vhodný pro schvalovací úřady jako důkaz o bezpečnosti celého systému, avšak na úkor vysoké pořizovací ceně.

7. Simulace v programu Matlab

Simulace v celého systému steer-by-wire v programu Matlab je velmi složitá aplikace. Pro simulaci co nejvíce blížíci se realitě je nutný správný matematický, fyzikální i numerický popis všech komponent systému. Pro co nejrealnější simulační model je nutné použít i simulační model celého automobilu. Některé faktory z jízdy automobilu ovlivňují celý systém steer-by-wire (např. tření mezi koly a vozovkou mohou ovlivnit dobu natočení kol atd.).

Simulační model snímače

Přenosová funkce senzoru

Pro vytvoření simulačního modelu je nutné nalézt pro každý konkrétní prvek systému vhodný přenos. Pokud je popis prvku lineární, přenosová funkce musí být také lineární. Přenosová funkce je definována jako podíl výstupní a vstupní veličiny systému (senzoru).

Přenos popisující snímač úhlu natočení lze napsat takto

$$G = \frac{U}{\beta} \quad (8)$$

kde G je přenos
 U je výstupní napětí
 β je úhel natočení

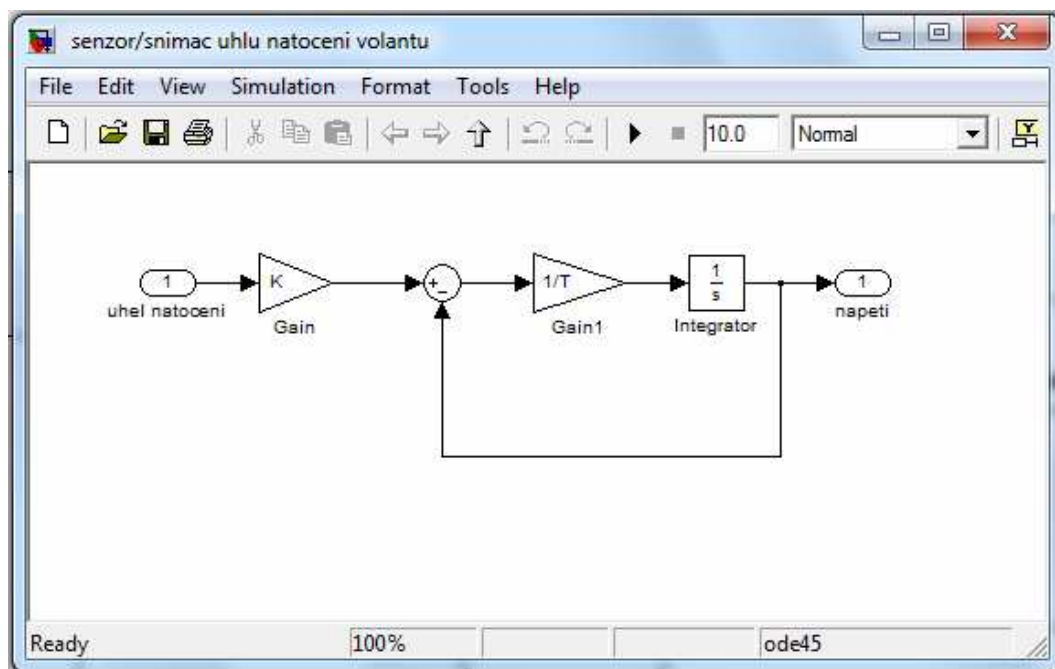
Tento přenos lze aproximovat přenosovou funkcí prvního řádu

$$G = \frac{K}{Ts + 1} \quad (9)$$

kde G je přenos
 T je časová konstanta
 s je laplaceův operátor
 K je zesílení

Zesílení lze spočítat jako poměr maximálního výstupního napětí a maximálního úhlu natočení

$$K = \frac{U_{\max}}{\alpha_{\max}} \quad (10)$$



Obr. 20 Simulační schéma senzoru úhlu natočení

Pro ostatní senzory, použité v systému steer-by-wire lze použít stejnou aproximační přenosovou funkci a tedy i stejné simulační schéma.

Simulační model motorů

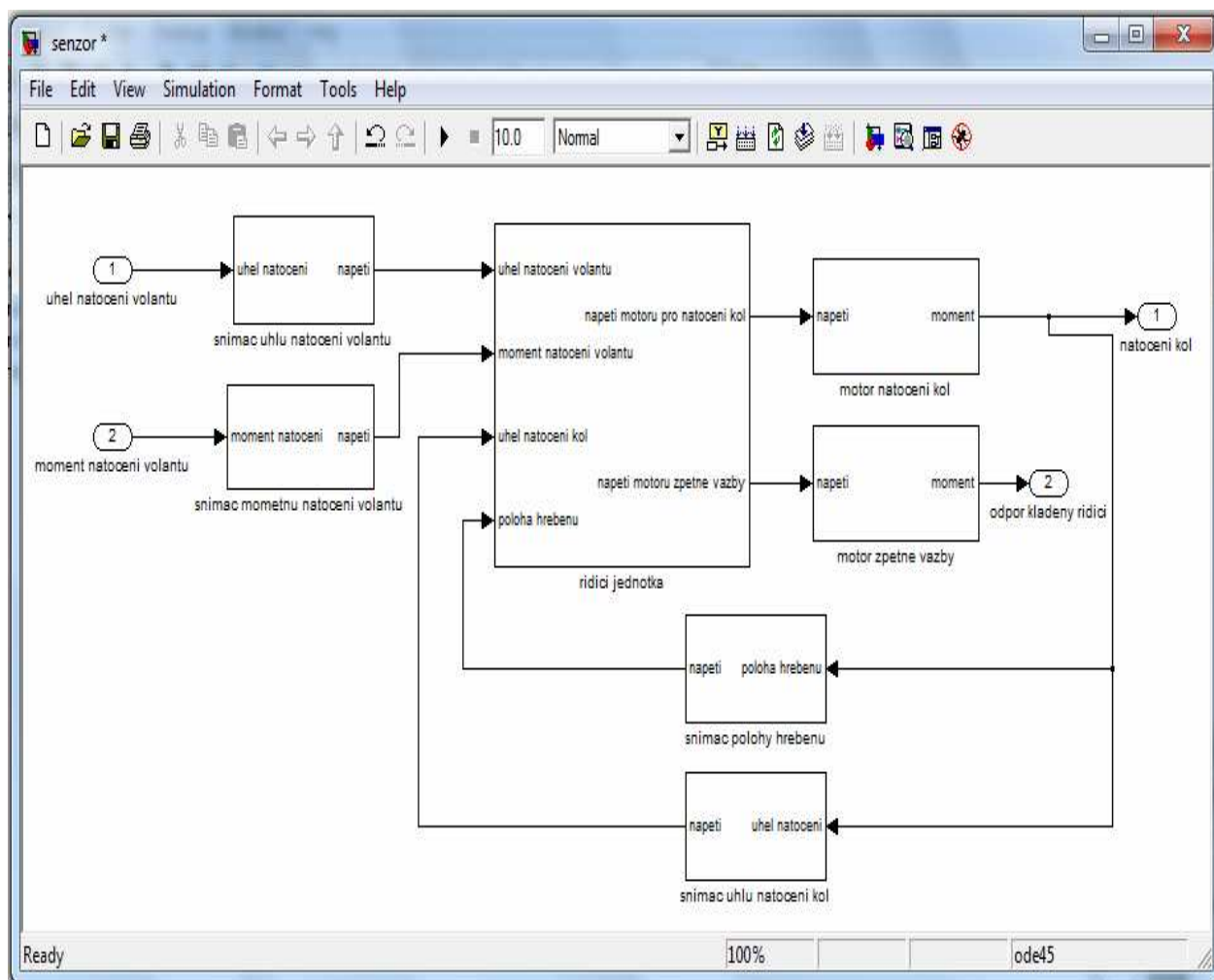
Přenosová funkce motoru

Tato přenosová funkce již nebude triviální jako u přenosové funkce snímače. Jeho fyzikální, matematický i numerický popis je poměrně složitý.

Simulační model elektronické řídicí jednotky

Přenosová funkce řídicí jednotky

Tato přenosová funkce je velmi složitá a její fyzikální, matematický i numerický popis je velmi složitý.



Obr. 21 Simulační schéma systému steer-by-wire

Závěr

V první části této diplomové práce jsem se zaměřil na v současnosti používané systémy „by-wire“. Zejména nejpoužívanější systém současnosti fly-by-wire. Analýzou fly-by-wire jsem se seznámil s problematikou a možnostmi systémů „by-wire“. Koncepce systému fly-by-wire je mnohem složitější a vyspělejší než u jakéhokoli řídicího systému používaného v automobilové technice, proto jsem podrobil analýze i systémy, které jsou již v automobilové technice používány.

Hlavním cílem práce byl návrh přestavby elektromechanického servořízení na systém steer-by-wire u automobilu Škoda. V samotném návrhu jsem se nejprve zaměřil na možnosti snímání vstupních veličin pro řídicí jednotku. Následným rozбором požadavků pro natáčení předních kol jsem navrhl akční člen. Jedná se o kombinaci elektromotoru a převodovky. Tato kombinace má dostatečný výkon a otáčky pro optimální nastavení kol do požadované polohy. Vybral jsem i vhodný motor zpětné vazby, který klade odpor řidiči při otáčení volantem. Dalším krokem byl návrh jízdních charakteristik. Tyto charakteristiky budou uloženy v řídicí jednotce a umožňují optimální řízení s ohledem na mnoho aspektů. Rozebrána je i bezpečnost systému steer-by-wire a návrh ochrany proti selhání celého systému. V poslední části je simulace tohoto systému v programu Matlab.

Všechny body zadání byli splněny. Jako pokračování této diplomové práce navrhuji důkladnou simulaci celého systému, která bude obsahovat automobilový model, modely okolních vlivů prostředí a model řidiče. Zároveň se simulací a modelováním je možné vytvořit reálný model přední nápravy včetně všech komponent systému. Po důkladném otestování funkčnosti celého systému a ověření správného návrhu jízdních charakteristik, bude možné celý systém aplikovat do automobilu pro jeho další testování a optimalizaci.

Literatura

- [1] THOM, Trevor. *Air Pilot's Manual : The Aeroplane-Technical*. 4th compl. edition. Shrewsbury : Airline Publishing Ltd., 1988. 176 s. ISBN 1840371552.
- [2] DUNBAR, Brian . *F-8 Digital Fly-By-Wire Aircraft* [online]. 2006 , 1.6.2008 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-024-DFRC.html>>.
- [3] VYSOKÝ, Doc. Ing. Petr, VYSOKÝ, Doc. Ing. Ondřej. *Současné trendy v řízení automobilových systémů* [online]. 2006 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=1183>>.
- [4] *ThyssenKrupp technologies Company* [online]. Maďarsko, 2007 [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.thyssenkrupp-presta.hu/index.php?menu=teszteles>>.
- [5] ERKINNEN Tom, LANGENWALTER Joachim, *Embedded Steer-by-Wire System Development* [online]. Německo, 2004 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <http://www.mathworks.com/products/featured/Embedded_Steer_by_Wire_System_Development.pdf>
- [6] *General Motors : Hy-wire Concept* [online]. 2002 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.autointell.com/nao_companies/general_motors/concepts-2003/gm_hy_wire/gm-hy-wire-02.htm>.
- [7] HAMMOND, Lou Ann. *Carlist* [online]. 1994 , 2009 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.carlist.com/autonews/2005/autonews_45.html>.
- [8] NEFF, John. *Autoblog* [online]. 2007 , 7.1.2007 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.autoblog.com/2007/01/07/detroit-auto-show-mazda-ryuga-concept/>>.

- [9] Škoda Auto a.s., *Podvozek a elektromechanické servořízení*. Mladá Boleslav: SP 58 – Škoda Octavia, Dílenská učební pomůcka.
- [10] Rick Wagoner, Chairman of GM, Detroit, *North American International Auto Show 2005*
- [11] Bob Lutz, Vice Chairman of Global Product Development at GM, *Detroit, North American International Auto Show 2006*
- [12] Pi Technology, *Drive By Wire* [online], Velká Británie, 2004 [cit. 2010-04-23]. Dostupný z WWW: <http://www.pi-shurlok.com/Shared/Uploads/NewsArticles/Files/Drive_By_Wire_-_Pininfarina.pdf>
- [13] Omron, *Accurax G5 rotary servo motors* [online], [cit. 2010-05-01]. Dostupný z WWW: <[http://downloads.industrial.omron.cz/IAB/Products/Motion and Drives/Servo Systems/Rotary Servo Motors/Accurax G5 \(servo motor\)/I100E/I100E-EN-01+Accurax-G5_Motors+Datasheet.pdf](http://downloads.industrial.omron.cz/IAB/Products/Motion and Drives/Servo Systems/Rotary Servo Motors/Accurax G5 (servo motor)/I100E/I100E-EN-01+Accurax-G5_Motors+Datasheet.pdf)>
- [14] Varvel, *Převodovky* [online], [cit. 2010-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.epo.cz/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=28&Itemid=49>
- [15] Kollmorgen, *Torque Feedback Device* [online], [cit. 2010-05-02]. Dostupný z WWW: <http://www.kollmorgen.com/website/com/eng/industry_solutions/torque_feedback_device.php>
- [16] VLK, F. *Podvozky motorových vozidel*, Brno : vydavatelství VLK , 2000. Str. 192-208. ISBN 80-238-5274-4.
- [17] MTS Sensors Group, *Lineární snímač polohy Tempsonics EP* [online], [cit. 2010-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.profess.sk/pdf_pci_cz/TemposonicEP.pdf >

- [18] KEBEŠ, Ing. Karel, *Magnetostrikční snímače vzdálenosti* [online]. 2006 [cit. 2010-04-01]. Dostupný z WWW:
<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34229>.
- [19] MACHÁČKOVÁ, Petra, *Automatická kalibrace snímačů vibrací* [online],
Brno: VUT Brno, 2008 [cit. 2010-06-01]. Dostupný z WWW:
<http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/ashv/texty/doly/07_poloha.pdf>

8. Přílohy

Příloha č. 1 – Technické parametry snímače Temposonics EP

TECHNICKÉ ÚDAJE

Měřicí rozsah:

Snímač s analogovým výstupem: 0...50 až 0...1500 mm

Snímač s impulsním výstupem: 0...50 až 3250 mm

VÝSTUP

Napětí: 0...10 V nebo 10...0 V, $R_Z \geq 5 \text{ k}\Omega$

Proud: 4...20 mA nebo 20...4 mA, $R_Z \leq 500 \Omega$

Binární: Impulsy Start / Stop, navíc přenos parametrů měřicí rozsah, offset, měřicí signál - rychlost, stav a ident. výrobce.

Rozlišení:

Analogový výstup: ∞

Impulsní výstup: 0,1; 0,01; 0,005 mm (odvislé od řídicí elektroniky)

Chyba linearity: $< \pm 0,02 \%$ z rozsahu (min. $\pm 60 \mu\text{m}$)

Měřicí frekvence:

Analogový: $> 1,5 \text{ kHz}$;

Impulsní: (odvislé od řídicí elektroniky)

Šum výstupu:

Analogový: $< 0,01\%$ z rozsahu

Impulsní: (odvislé od řídicí elektroniky)

NAPÁJENÍ

Napájecí napětí: 24 V_{ss} (+20, -15%)

- odolnost proti přepólování: do -30Vdc

- odolnost proti přepětí: do 36 Vdc

Dovolené zvlnění: $< 1\%$ šp-šp

Proudový odběr:

Analogový 50-140 mA

Impulsní 50-100 mA (podle rozsahu)

Elektrická pevnost: 500 V (DC zem vůči kostře stroje)

PODMÍNKY PROSTŘEDÍ

Rychlost pohybu magnetu: Libovolná

Přípustná teplota: -40...+75°C

Relativní vlhkost: $\leq 90\%$, nekondenzující

Třída krytí: IP 65 (pouze s připojeným konektorem)

Odolnost vůči rázům: 100 g (IEC-Standard 68-2-27)

Odolnost vůči chvění: 15 g / 10...2000 Hz (IEC-Standard 68-2-6)

Elektromagnetická kompatibilita:

EN 50081-1, EN 50082-2, EN 61000-4-2/3/4/6, úroveň 3/4, kritérium A, CE certifikát

VŠEOBECNÉ ÚDAJE

Elektrické připojení: 6tíkolíkový konektor

Příloha č. 2 – Technické parametry servomotoru SMGEV 04A

General specifications

Speed/torque control mode	Performance	Speed control range	1:5000
		Speed variance	Load variance: During 0 to 100% load $\pm 0.01\%$ max. (at rated speed)
		Voltage variance	Rated voltage $\pm 10\%$: 0% (at rated speed)
		Temperature variance	$25 \pm 25^\circ\text{C}$: $\pm 0.1\%$ max. (at rated speed)
		Frequency characteristics	1.6 kHz
	Input signal	Torque control accuracy (Repeatability)	$\pm 1\%$
		Soft start time setting	0 to 10 s (acceleration, deceleration can each be set.)
		Speed reference input	Reference voltage: ± 6 VDC (forward motor rotation if positive reference) at rated speed; Set at delivery Variable setting range: ± 2 to ± 10 VDC at rated speed/ max. input voltage: ± 12 V
		Input impedance	Approx. 14 k Ω
		Circuit time constant	Approx. 30 μs
Position control mode	Input signal	Torque reference input	Reference voltage: ± 3 VDC (forward rotation if positive reference) at rated torque; Set at delivery Variable setting range: ± 1 to ± 10 VDC at rated torque reference, max. input voltage: ± 12 V
		Input impedance	Approx. 14 k Ω
		Circuit time constant	Approx. 30 μs
		Feedforward compensation	0 to 100% (setting resolution: 1%)
		Position completed width setting	0 to 1073741824 command units (setting resolution: 1 command unit)
	Command pulse	Input pulse type	Sign + pulse train, 90° phase displacement 2-phase pulse (A-phase+ B-phase) or CCW/CW pulse train
		Input pulse form	Non-insulated line driver (+5 V level), open collector.
		Input pulse frequency	0 to 4 Mpps (200 Kpps max. at open collector)
	Control signal	Control signal	Clears error pulse by external signal
I/O signal	Position signal output		A-phase, B-phase, C-phase: line driver output.
	Sequence input signal		Servo ON, P control (or control mode switching, forward/reverse motor rotation by internal speed setting, zero clamp, command pulse inhibit), forward/reverse run prohibit, forward/reverse current limit (or internal speed switching), alarm reset.
	Sequence output signal		Servo alarm, alarm codes (3-bit output): CN1 output terminal is fixed It is possible to output three types of signal form incl.: positioning complete, speed coincidence detection, servo-motor rotation detection, servo ready, current limit detection, speed limit detection, brake release, warning, NEAR.
Integrated functions	USB Communications	Interface	Personal computer
		Communications standard	Compliant with USB1.1 standard (12 Mbps)
		Function	Status display, parameter settings, adjustment functions, utility functions, alarm traceback display, JOG run/autotuning operations and graphing functions for speed/torque command signal, etc
	Automatic load inertia detection		Automatic motor parameter setting. One parameter rigidity setting.
	Dynamic brake (DB)		Operates during main power OFF, servo alarm, servo OFF or overtravel
	Regenerative processing		Internal resistor included in models from 500 W to 5 kW. Regenerative resistor externally mounted (option).
	Overtravel (OT) prevention function		DB stop, deceleration stop or coast to stop during P-OT, N-OT operation
	Encoder divider function		Optional division pulses possible
	Electronic gearing		$0.01 < \text{Numerator/Denominator} < 100$
	Internal speed setting function		3 speeds may be set internally
	Protective functions		Overcurrent, overvoltage, low voltage, overload, regenerative error
	Analog monitor functions for supervision		Integrates analog monitor connector for supervision of the speed and torque reference signals, etc. Number of channels: 2 (Output voltage: ± 10 V DC)
	Panel operator	Display functions	CHARGE, 7-segments LEDx5
		Panel operator keys	Used to set parameters (4 keys)
	Safety functions		Hard wire base block signal and status monitor (fixed output) of safety circuit
	Others		Reverse connection, zero search, automatic motor discrimination function, and DC reactor connection terminal for high frequency power suppression function.

Position/speed/torque control mode	Speed control range		1:5000	
	Speed variance	Load variance	During 0 to 100% load $\pm 0.01\%$ max. (at rated speed)	
		Voltage variance	Rated voltage $\pm 10\%:0\%$ (at rated speed)	
		Temperature variance	25 ± 25 °C: ± 0.1 % max. (at rated speed)	
	Frequency characteristics		1.6 kHz	
	Torque control accuracy (Repeatability)		$\pm 1\%$	
	Soft start time setting		0 to 10 s (acceleration, deceleration can each be set.)	
	MECHATROLINK Communication		MECHATROLINK-II commands (for sequence, motion, data setting/reference, monitor, adjustment and other commands)	
	IO signal	Position signal output		A-phase, B-phase, C-phase: line driver output.
		Sequence input signal		Homing deceleration limit switch, forward/reverse run prohibited, external latch signals, forward/reverse current limit.
Sequence output signal		It is possible to output three types of signal form incl.: positioning complete, speed coincidence detection, servo-motor rotation detection, servo ready, current limit detection, speed limit detection, brake release, warning, NEAR.		
Integrated functions	Communications	USB Communications	Interface	Personal computer
			Communications standard	Compliant with USB1.1 standard (12 Mbps)
		Mechatrolink Communications	Function	Status display, parameter setting, adjusting functions, utility functions, alarm traceback display, JOG run/autotuning operations and graphing functions for speed/torque command signal, etc
			Communications protocol	MECHATROLINK-II
			Station Address	41H to 5FH (max. number of slaves: 30)
			Transmission Speed	10 Mbps
			Transmission Cycle	250 μ s, 0.5 to 4.0 ms (multiple of 0.5 ms)
	Data length	17-bytes and 32-bytes		
	Automatic load inertia detection		Automatic motor parameter setting. One parameter rigidity setting.	
	Dynamic brake (DB)		Operates during main power OFF, servo alarm, servo OFF or overtravel	
	Regenerative processing		Internal resistor included in models from 500 W to 5 kW. Regenerative resistor externally mounted (option).	
	Overtravel (OT) prevention function		DB stop, deceleration stop or coast to stop during P-OT, N-OT operation	
	Encoder divider function		Optional division pulses possible	
	Electronic gearing		0.01< Numerator/Denominator<100	
	Internal speed setting function		3 speeds may be set internally	
	Protective functions		Overcurrent, overvoltage, low voltage, overload, regeneration error	
	Analog monitor functions for supervision		Integrates analog monitor connectors for supervision of the speed and torque reference signals, etc. Number of channels: 2 (Output voltage: ± 10 V DC).	
Panel operator	Display functions	CHARGE, 7-segments LEDX1		
	Switches	Rotary switch: MECHATROLINK-II station address setting (16 channels) DIP switch: MECHATROLINK-II communications setting (4 channels)		
Safety functions		Hard wire base block signal and status monitor (fixed output) of safety circuit		
Others		Reverse connection, zero search, automatic motor discrimination function, and DC reactor connection terminal for high frequency power suppression function.		

Type SGMEV, 230 V/400 V

Ratings and specifications

Applied voltage		230 V					400 V					
Servo motor model SGMEV-□		01A□	02A□	04A□	08A□	15A□	02D□	03D□	04D□	07D□	08D□	15D□
Rated output ¹	W	100	200	400	750	1500	200	300	400	650	750	1500
Rated torque ^{1,2}	N·m	0.318	0.637	1.27	2.39	4.77	0.637	0.955	1.27	2.07	2.39	4.77
Instantaneous peak torque ¹	N·m	0.955	1.91	3.82	7.16	14.3	0.191	3.82	3.82	7.16	7.16	14.3
Rated current ¹	A (rms)	0.89	2.0	2.6	4.1	7.5	1.4	1.3	1.4	2.2	2.6	4.5
Instantaneous max. current ¹	A (rms)	2.8	6.5	8.5	13.9	23.0	4.5	5.1	4.4	8.4	7.8	13.7
Rated speed ¹	min ⁻¹	3000										
Max. speed ¹	min ⁻¹	5000										
Torque constant	N·m/A (rms)	0.392	0.349	0.535	0.641	0.687	0.481	0.837	0.963	1.02	0.994	1.135
Rotor moment of inertia (JM)	kg·m ² ×10 ⁻⁴ (without brake)	0.049	0.193	0.331	2.1	4.02	0.193	0.173	0.331	0.672	2.1	4.02
	kg·m ² ×10 ⁻⁴ (with brake)	0.078	0.302	0.440	2.975	4.895	0.302	0.231	0.440	0.812	2.975	4.895
Allowable load moment of inertia (JL)	Multiple of (JM)	25	15	7	5		15	20	7	20	5	
Rated power rate ¹	kW/s	20.6	21.0	49.0	27.1	56.7	21	52.9	49.0	63.8	27.1	56.7
Rated angular acceleration ¹	rad/s ²	64800	33000	38500	11400	11900	33000	55300	38500	30800	11400	11900
Encoder	Standard	Incremental encoder (20 bits)										
	Option	Absolute encoder (20 bits)										
Allowable radial load	N	78	245		392	490	245	345	245	392		490
Allowable thrust load	N	49	68		147		68	74	68	147		
Approx. mass	Kg (without brake)	0.7	1.4	2.1	4.2	6.6	1.4	1.7	2.1	3.4	4.2	6.6
	Kg (with brake)	0.9	1.9	2.6	5.7	8.1	1.9	2.2	2.6	4.3	5.7	8.1
Holding brake moment of inertia J	kg·m ² ×10 ⁻⁴	0.029	0.109		0.875		0.109	0.058	0.109	0.140	0.875	
Basic specifications	Time rating	Continuous										
	Thermal class	Class B										
	Usage/ storage temperature	0 to +40 °C/ -20 to 60 °C without freezing										
	Usage/ storage humidity	20 to 80% RH (non-condensing)										
	Vibration class	15 µm or below										
	Insulation resistance	500 VDC, 10 MOhm min.										
	Withstand voltage	1500 VAC for one minute										
	Enclosure	Totally-enclosed, self-cooled, IP55 ³										
	Vibration resistance	Vibration acceleration xx m/s2										
	Altitude	1000 m or less above sea level										
Mounting	Flange-mounted											

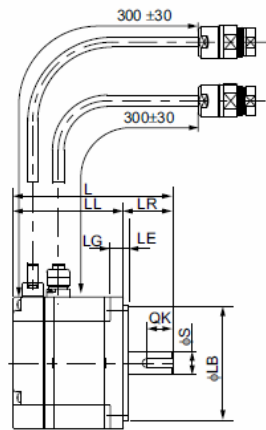
Note: *1. These items and torque/speed characteristics quoted in combination with an SGDV servo drive are at an armature winding temperature of 100°C. Other values quoted are at 20°C.

*2. The rated torques listed here are the values for the continuous allowable torque at 40°C with an aluminium heatsink of the following dimensions attached (SGMEV-01A/02A/04A/02D/03D/04D/07D: 250 mm x 250 mm x 6 mm, SGMEV-08A/15A/08D/15D: 300 mm x 300 mm x 12 mm)

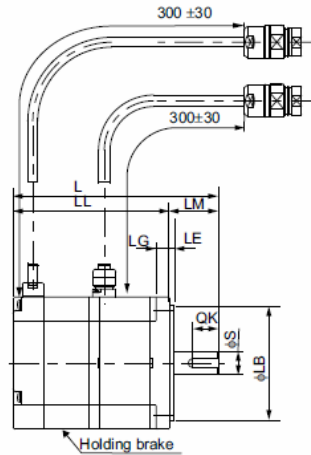
*3. IP55 in case of standard cable attaching. IP67 is possible unless SGMEV-03D/07D servomotors.

Type SGMEV (230/400 V, 100 - 1500 W)

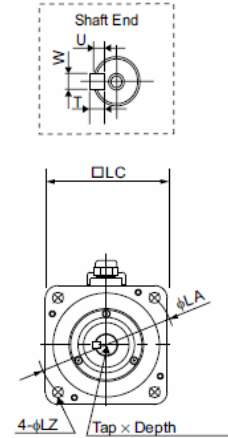
Dimensions (mm)	Without brake		With brake		LM	Flange Face Dimensions						Shaft End Dimensions						Approx. Mass (Kg)	
Model	L	LL	L	LL		LA	LB	LC	LE	LG	LZ	S	QK	W	T	U	Tap x Depth	Without brake	With brake
SGMEV-01A A6 I-OY	87	62	116	91	25	70	50 ⁰ _{-0.030}	60	3	6		8 ⁰ _{-0.011}	14	3	3	1.8	M3 x 6L	0.7	0.9
SGMEV-02A A6 I-OY	97	67	128.5	98.5	30	90	70 ⁰ _{-0.030}	80		8	7	14 ⁰ _{-0.011}	16	5	5	3	M5 x 8L	1.4	1.9
SGMEV-02D A6 I-OY																		2.1	2.6
SGMEV-04A A6 I-OY	117	87	148.5	118.5															
SGMEV-04D A6 I-OY																			
SGMEV-08A A6 I-OY	126.5	86.5	160	120	40	145	110 ⁰ _{-0.035}	120	3.5	10	10	16 ⁰ _{-0.011}	22					4.2	4.7
SGMEV-08D A6 I-OY																			
SGMEV-15A A6 I-OY	154.5	114.5	188	148								19 ⁰ _{-0.013}		6	6	3.5	M6 x 10L	6.6	8.1
SGMEV-15D A6 I-OY																			



Models without Brake

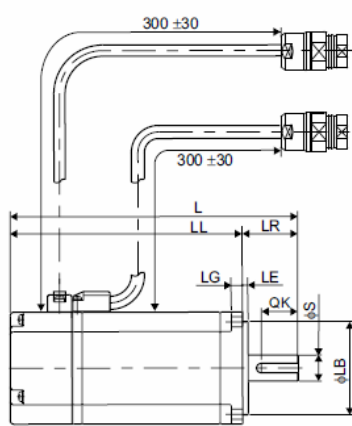


Models with Brake

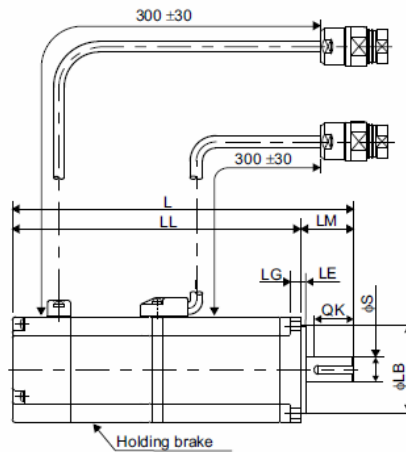


Type SGMEV (400 V, 300 - 650 W)

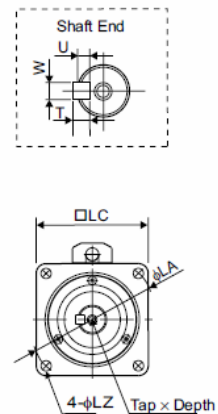
Dimensions (mm)	Without brake		With brake		LM	Flange Face Dimensions						Shaft End Dimensions						Approx. Mass (Kg)	
Model	L	LL	L	LL		LA	LB	LC	LE	LG	LZ	S	QK	W	T	U	Tap x Depth	Without brake	With brake
SGMEV-03D A6 I-OY	154.5	124.5	194	164	30	70	50 ⁰ _{-0.025}	60	3	6	5.5	14 ⁰ _{-0.011}	20	5	5	3	M5 x 8L	1.7	2.2
SGMEV-07D A6 I-OY	185	145	229.5	189.5	40	90	70 ⁰ _{-0.030}	80	3	8	70	16 ⁰ _{-0.011}	30					3.4	4.3




Models without Brake



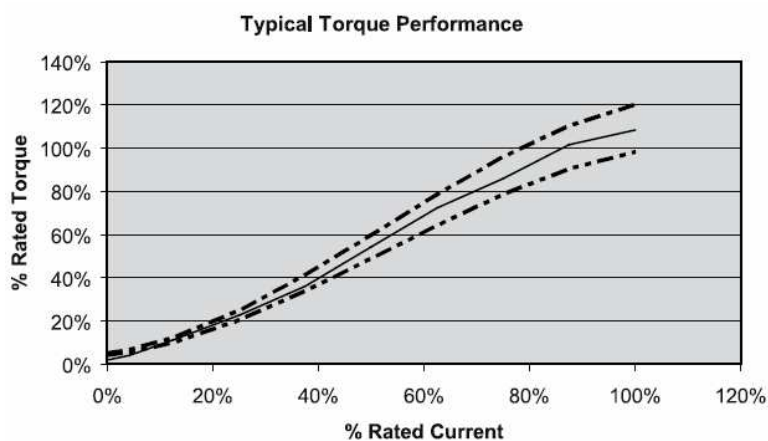
Models with Brake



Symbol	Specifications				Servo motor model	Compatible servo drives (2)	
	Voltage	Encoder and design	Rated torque	Capacity		Sigma-5	
	230 V	Incremental encoder (20 bit)	Without brake	0.318 Nm	100 W	SGMEV-01ADA61-OY	SGDV-01A□□1A-OY
				0.637 Nm	200 W	SGMEV-02ADA61-OY	SGDV-02A□□1A-OY
				1.27 Nm	400 W	SGMEV-04ADA61-OY	SGDV-04A□□1A-OY
				2.39 Nm	750 W	SGMEV-08ADA61-OY	SGDV-08A□□1A-OY
				4.77 Nm	1.5 kW	SGMEV-15ADA61-OY	SGDV-15A□□1A-OY-008000
			With brake	0.318 Nm	100 W	SGMEV-01ADA6C-OY	SGDV-01A□□1A-OY
				0.637 Nm	200 W	SGMEV-02ADA6C-OY	SGDV-02A□□1A-OY
				1.27 Nm	400 W	SGMEV-04ADA6C-OY	SGDV-04A□□1A-OY
				2.39 Nm	750 W	SGMEV-08ADA6C-OY	SGDV-08A□□1A-OY
				4.77 Nm	1.5 kW	SGMEV-15ADA6C-OY	SGDV-15A□□1A-OY-008000
		Absolute encoder (20 bit)	Without brake	0.318 Nm	100 W	SGMEV-01A3A61-OY	SGDV-01A□□1A-OY
				0.637 Nm	200 W	SGMEV-02A3A61-OY	SGDV-02A□□1A-OY
				1.27 Nm	400 W	SGMEV-04A3A61-OY	SGDV-04A□□1A-OY
				2.39 Nm	750 W	SGMEV-08A3A61-OY	SGDV-08A□□1A-OY
				4.77 Nm	1.5 kW	SGMEV-15A3A61-OY	SGDV-15A□□1A-OY-008000
			With brake	0.318 Nm	100 W	SGMEV-01A3A6C-OY	SGDV-01A□□1A-OY
				0.637 Nm	200 W	SGMEV-02A3A6C-OY	SGDV-02A□□1A-OY
				1.27 Nm	400 W	SGMEV-04A3A6C-OY	SGDV-04A□□1A-OY
	2.39 Nm			750 W	SGMEV-08A3A6C-OY	SGDV-08A□□1A-OY	
	4.77 Nm			1.5 kW	SGMEV-15A3A6C-OY	SGDV-15A□□1A-OY-008000	
	400 V	Incremental encoder (20 bit)	Without brake	0.637 Nm	200 W	SGMEV-02DDA61-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				0.955 Nm	300 W	SGMEV-03DDA61-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				1.27 Nm	400 W	SGMEV-04DDA61-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				2.07 Nm	650 W	SGMEV-07DDA61-OY	SGDV-10D□□1A-OY
				2.39 Nm	750 W	SGMEV-08DDA61-OY	SGDV-10D□□1A-OY
			With brake	0.637 Nm	200 W	SGMEV-02DDA6C-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				0.955 Nm	300 W	SGMEV-03DDA6C-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				1.27 Nm	400 W	SGMEV-04DDA6C-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				2.07 Nm	650 W	SGMEV-07DDA6C-OY	SGDV-10D□□1A-OY
				2.39 Nm	750 W	SGMEV-08DDA6C-OY	SGDV-10D□□1A-OY
		Absolute encoder (20 bit)	Without brake	0.637 Nm	200 W	SGMEV-02D3A61-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				0.955 Nm	300 W	SGMEV-03D3A61-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				1.27 Nm	400 W	SGMEV-04D3A61-OY	SGDV-05D□□1A-OY
				2.07 Nm	650 W	SGMEV-07D3A61-OY	SGDV-10D□□1A-OY
				2.39 Nm	750 W	SGMEV-08D3A61-OY	SGDV-10D□□1A-OY
			With brake	0.637 Nm	200 W	SGMEV-02D3A6C-OY	SGDV-05D□□1A-OY
0.955 Nm				300 W	SGMEV-03D3A6C-OY	SGDV-05D□□1A-OY	
1.27 Nm				400 W	SGMEV-04D3A6C-OY	SGDV-05D□□1A-OY	
			2.07 Nm	650 W	SGMEV-07D3A6C-OY	SGDV-10D□□1A-OY	
			2.39 Nm	750 W	SGMEV-08D3A6C-OY	SGDV-10D□□1A-OY	
			4.77 Nm	1.5 kW	SGMEV-15D3A6C-OY	SGDV-15D□□1A-OY	
			0.637 Nm	200 W	SGMEV-02D3A6C-OY	SGDV-05D□□1A-OY	
			0.955 Nm	300 W	SGMEV-03D3A6C-OY	SGDV-05D□□1A-OY	

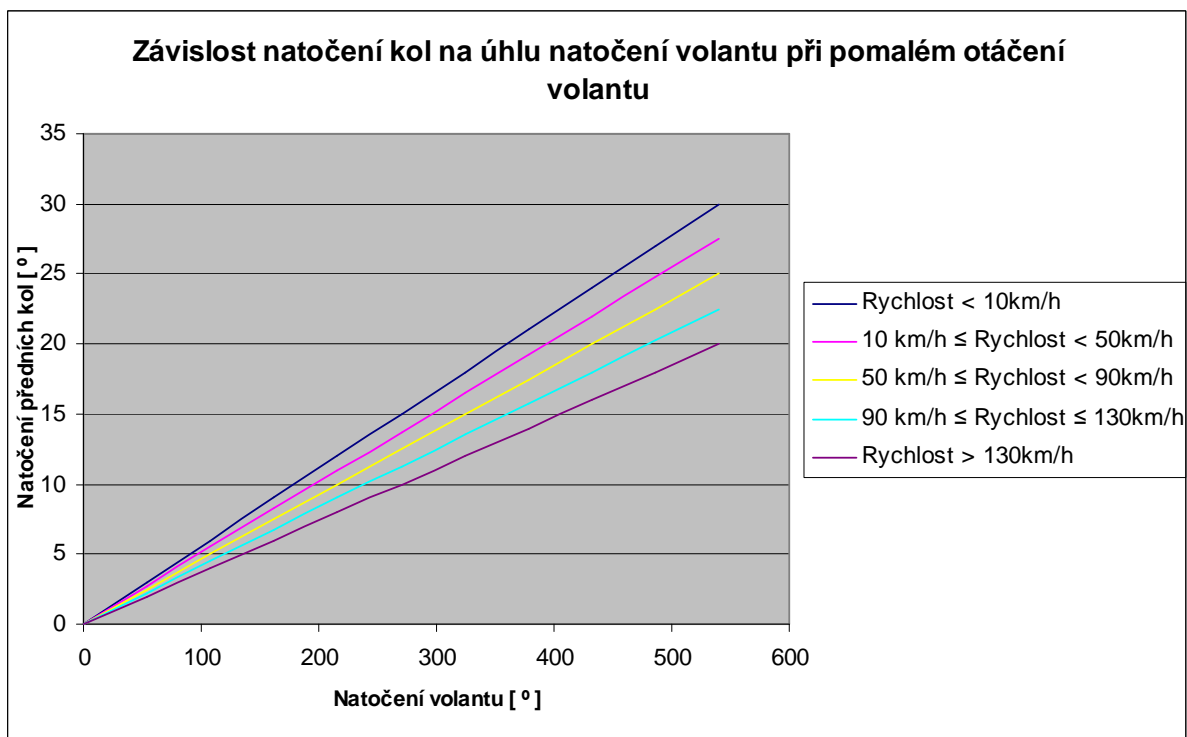
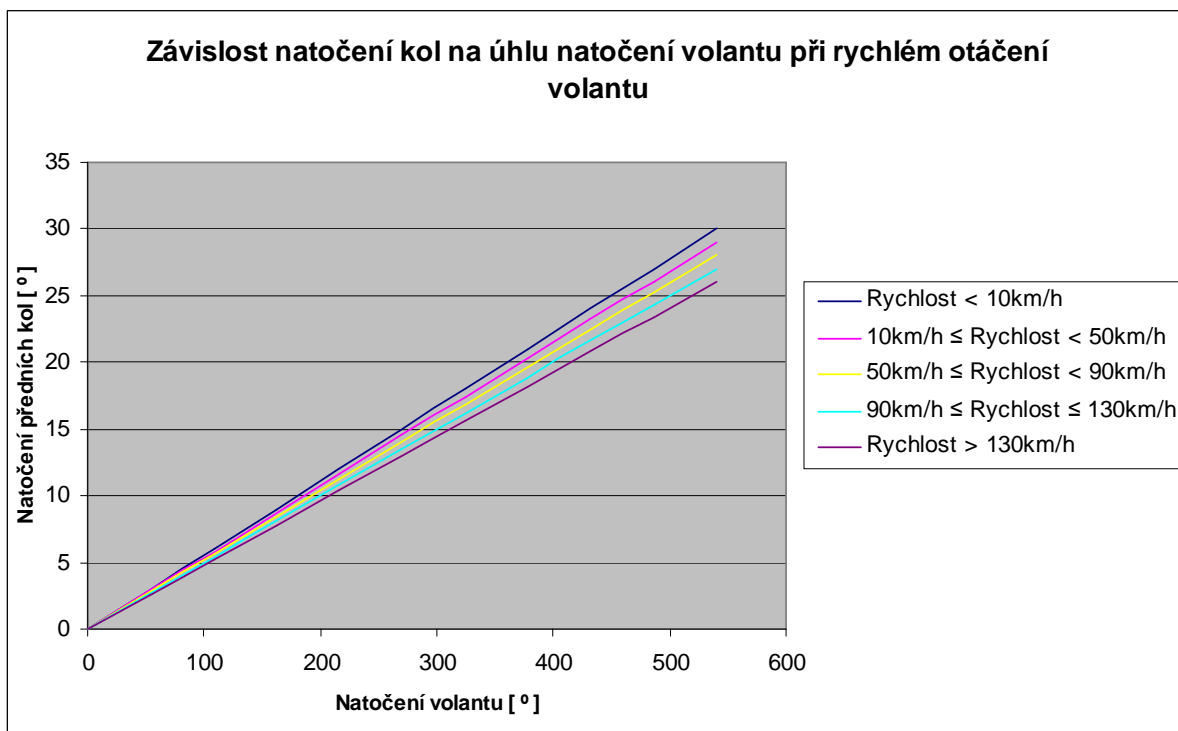
Příloha č. 3 – Parametry motoru TFD-40 050

PERFORMANCE							
Model	Static Torque lb-in (Nm)	Coil Voltage* VDC	Resistance Ohms @ 20°C nom	Power Watts max	Speed* RPM	Rotor Inertia lb-in-sec ²	Weight lb (kg)
TFD-40 050	44 (5.0)	12	3.5	42	300/120	76 X 10 ⁻³	6.2 (2.8)
		24	11.0	51	300/120	76 X 10 ⁻³	6.2 (2.8)
		36	22.7	57	300/120	76 X 10 ⁻³	6.2 (2.8)
		48	35.5	65	300/120	76 X 10 ⁻³	6.2 (2.8)
		48	35.5	65	300/120	76 X 10 ⁻³	6.2 (2.8)
TFD-40 090	80 (9.0)	12	3.5	42	300/120	10 X 10 ⁻²	6.2 (2.8)
		24	11.0	51	300/120	10 X 10 ⁻²	6.2 (2.8)
		36	22.7	57	300/120	10 X 10 ⁻²	6.2 (2.8)
		48	35.5	65	300/120	10 X 10 ⁻²	6.2 (2.8)
TFD-40 120	106 (12.0)	12	3.5	42	300/120	13 X 10 ⁻²	6.2 (2.8)
		24	11.0	51	300/120	13 X 10 ⁻²	6.2 (2.8)
		36	22.7	57	300/120	13 X 10 ⁻²	6.2 (2.8)
		48	35.5	65	300/120	13 X 10 ⁻²	6.2 (2.8)



% Rated Torque	% Rated Current
2%	0%
25%	28%
50%	47%
75%	65%
100%	88%

Příloha č. 4 – Charakteristiky pro zatáčení vpravo



Příloha č. 5 – Charakteristiky pro zatáčení vlevo

Řídicí charakteristika P6 pro zatáčení vlevo a rychlost automobilu $v < 10\text{km/h}$

Charakteristika P6 pro zatáčení vlevo v malých rychlostech	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v > 0 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-30^\circ \leq \alpha < 0^\circ$
rychlost automobilu	$v < 10 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,5 \text{ s}$

Řídicí charakteristiky P7 pro zatáčení vlevo a rychlost automobilu $10 \leq v < 50\text{km/h}$

Charakteristika P7-1 pro zatáčení vlevo a rychlé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v \geq 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-29^\circ \leq \alpha < 0^\circ$
rychlost automobilu	$10 \leq v < 50 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,147 \text{ s}$

Charakteristika P7-2 pro zatáčení vlevo a pomalé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v < 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-27,5^\circ < \alpha \leq 0^\circ$
rychlost automobilu	$10 \leq v < 50 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,292 \text{ s}$

Řídicí charakteristiky P7 pro zatáčení vlevo a rychlost automobilu $50 \leq v < 90\text{km/h}$

Charakteristika P8-1 pro zatáčení vpravo a rychlé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v \geq 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-28^\circ \leq \alpha < 0^\circ$
rychlost automobilu	$50 \leq v < 90 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,333 \text{ s}$

Charakteristika P8-2 pro zatáčení vpravo a pomalé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v < 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-25^\circ \leq \alpha < 0^\circ$
rychlost automobilu	$50 \leq v < 90 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,083 \text{ s}$

Řídící charakteristiky P8 pro zatáčení vlevo a rychlost automobilu $90 \leq v \leq 130 \text{ km/h}$

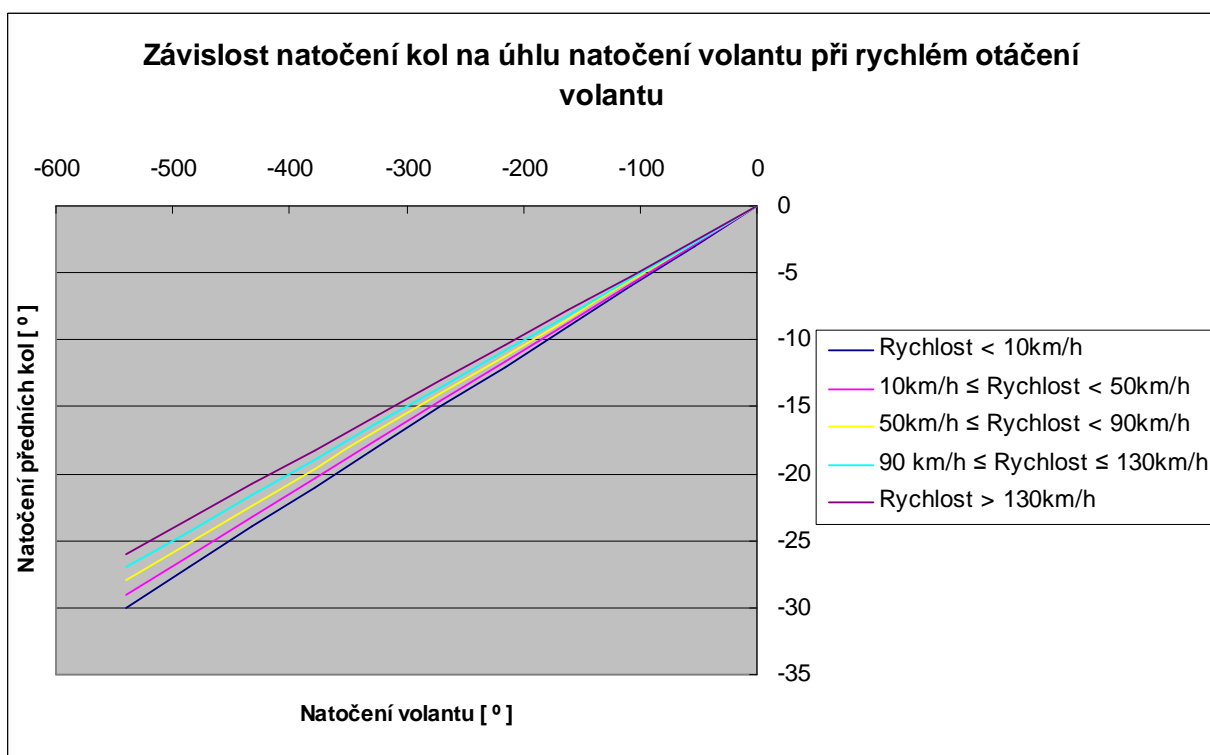
Charakteristika P8-1 pro zatáčení vpravo a rychlé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v \geq 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-27^\circ \leq \alpha < 0^\circ$
rychlost automobilu	$90 \leq v \leq 130 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,225 \text{ s}$

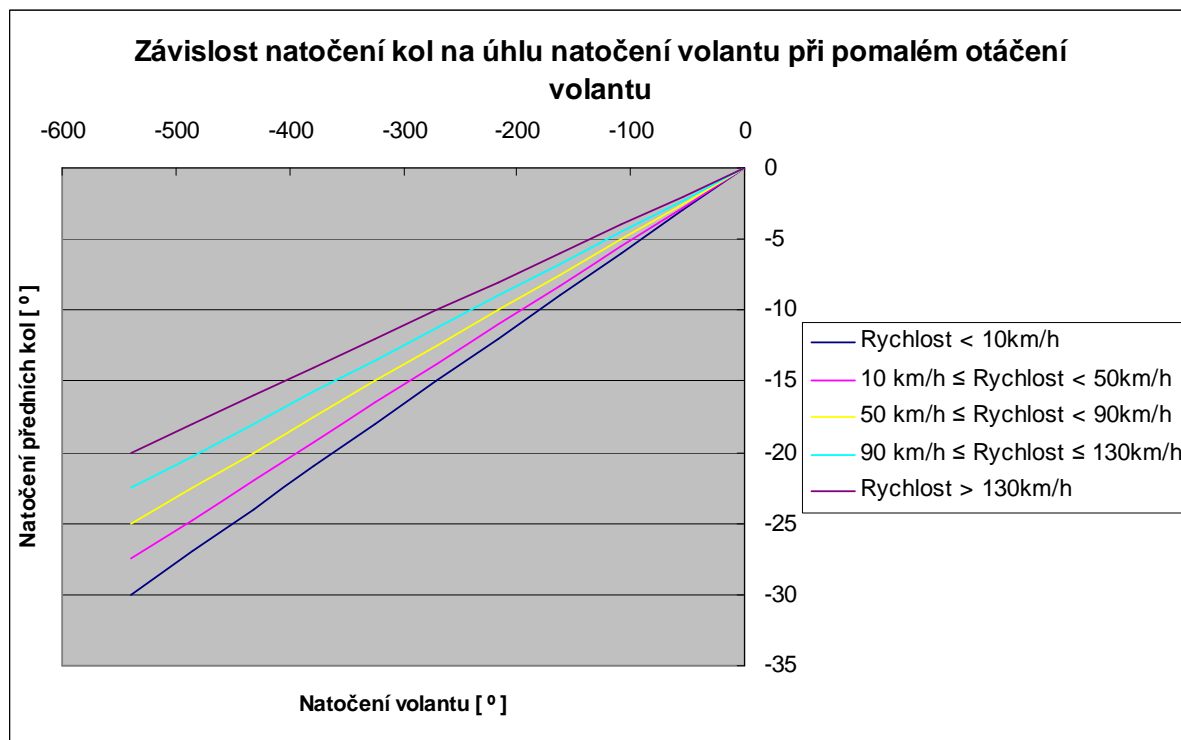
Charakteristika P8-2 pro zatáčení vpravo a pomalé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v < 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-22,5^\circ \leq \alpha < 0^\circ$
rychlost automobilu	$90 \leq v \leq 130 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 1,875 \text{ s}$

Řídící charakteristiky P9 pro zatáčení vlevo a rychlost automobilu $v > 130 \text{ km/h}$

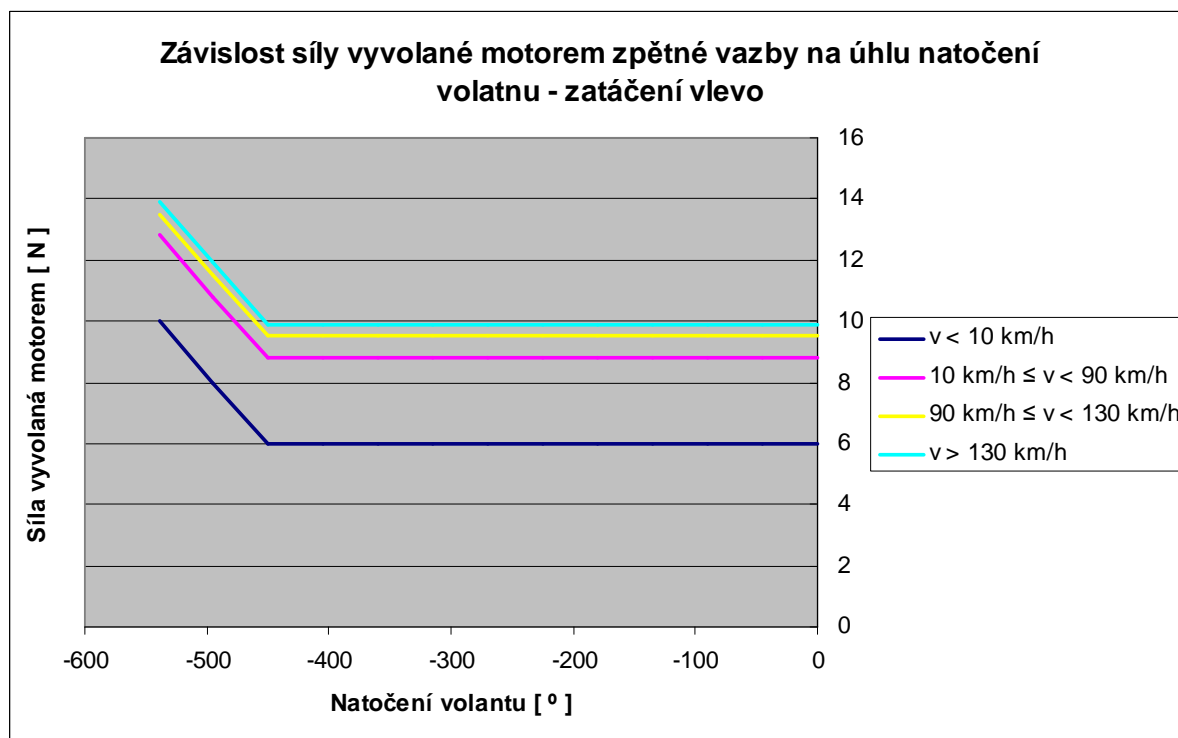
Charakteristika P9-1 pro zatáčení vpravo a rychlé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v \geq 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-26^\circ \leq \alpha < 0^\circ$
rychlost automobilu	$v > 130 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 2,167 \text{ s}$

Charakteristika P9-2 pro zatáčení vpravo a pomalé otáčení volantem	
úhel natočení volantu	$-360^\circ \leq \beta < 0^\circ$
rychlost natočení volantu	$v_v < 0,75 \text{ ot/s}$
natočení předních kol	$-20^\circ \leq \alpha < 0^\circ$
rychlost automobilu	$v > 130 \text{ km/h}$
čas pro natočení kol	$t_m = 1,667 \text{ s}$

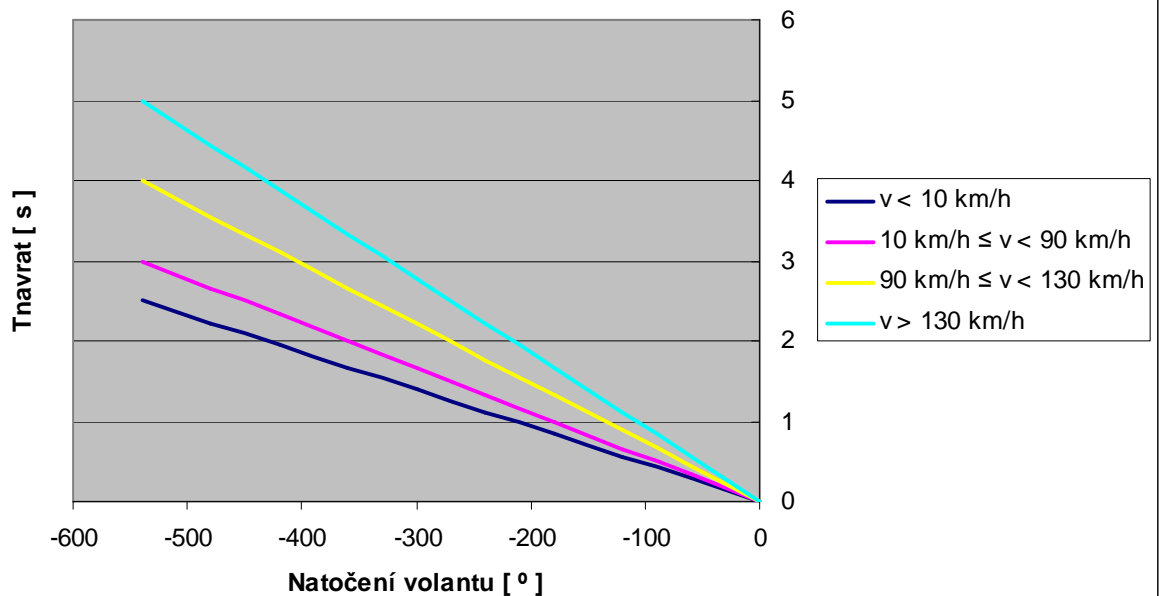




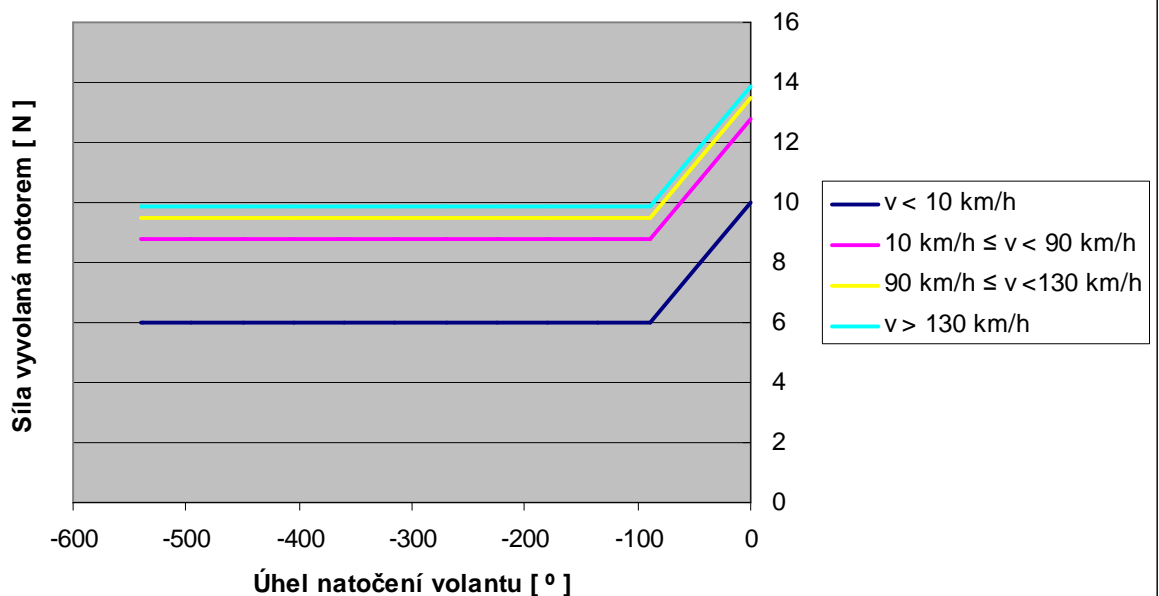
Příloha č. 6 – Charakteristiky pro motor zpětné vazby a zatáčení vlevo



Závislost natočení volantu na času při automatickém návratu volantu zleva do nulové polohy



Závislost síly na úhlu natočení volantu při návratu do nulové polohy zleva



Příloha č. 7 – Obsah CD

diplomova_prace.pdf

simulacni_model.mdl